PIANO STRUTTURALE DI CONSERVAZIONE E VALORIZZAZIONE DEL SISTEMA DELLE MURA DELLA CITTÀ DI SENIGALLIA

INDAGINI GEOTECNICHE, CHIMICHE E FISICHE

SULLE MALTE STRUTTURALI E DI RIEMPIMENTO DEI GIUNTI

Dott. Valentina Iampieri

Tutor: Prof. Paolo Busdraghi - Prof. Francesco Veneri

1. PREMESSA

Il Comune di Senigallia, nell'ambito della redazione del piano di conservazione e valorizzazione del sistema delle mura della città di Senigallia, al fine di "(…) apportare le competenze scientifiche necessarie ad un tema delicato e sensibile che necessita di basi teoriche, studi, competenze consolidate (…)", ha voluto coinvolgere le professionalità presenti nelle locali università. Pertanto, con determinazione dirigenziale n.721 del 12/07/2011, il Comune ha affidato le indagini di carattere geotecnico, chimico e fisico sulle malte strutturali e di riempimento dei giunti delle Mura cittadine cinquecentesche e settecentesche alla Dr.ssa Geol. Valentina Iampieri, dottoranda del Dottorato di Ricerca in Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Urbino "Carlo Bo", coordinata dal Tutor Prof. Francesco Veneri e co-Tutor Prof. Paolo Busdraghi, rispettivamente dell'Università di Urbino e dell'Università di Camerino.

Il lavoro è stato svolto secondo quanto sancito dalla Commissione NorMaL (NORmalizzazione MAteriali Lapidei), nata nel 1977, su iniziativa di un gruppo di studiosi del Consiglio Nazionale delle Ricerche e dell'Istituto Centrale per il Restauro, al fine di individuare metodologie di studio unificate e specifiche per il settore della conservazione dei materiali lapidei, nell'ambito dei Beni Culturali. Promotore dell'iniziativa fu Giovanni Urbani (direttore dell'ICR) e convinto assertore dell'importanza e della inderogabile necessità di individuare metodologie di studio unificate.

La proposta venne presentata per la prima volta nel 1977, all'*International Symposium on Conservation on Stone Materials* tenutosi a Bologna, sotto l'egida dell'*International Institute for Conservation* (IIC). La relazione aveva il titolo di "Artistic Stone Works - A proposal for the Unification of the Methods of Studying Stone Decay and of Controlling Stone Conservation", e venne presentata da un gruppo composto da Giovanna Alessandrini, Carlo Manganelli del Fa, Paola Rossi-Doria, Marisa Laurenzi Tabasso, Sergio Vannucci (con quest'ultimo Paolo Busdraghi ha fatto parte, sin dalla sua formazione, del Centro Petrografia Applicata, presso l'Accademia dei Lincei).

Inizialmente la Commissione venne costituita da soli quattro Gruppi di lavoro:

NorMaL C - metodologie chimiche,

NorMaL P - metodologie petrografiche,

NorMaL B - metodologie biologiche,

NorMaL F - metodologie fisico-meccaniche).

Scopo della Commissione NorMaL era quello di stabilire metodi unificati per lo studio delle alterazioni dei materiali lapidei e per il controllo dell'efficacia dei trattamenti conservativi di manufatti di interesse storico – artistico, interessandosi unicamente dei materiali lapidei, intendendosi con tale termine non solo le pietre naturali, ma anche i materiali artificiali utilizzati in architettura, quali stucchi, malte (indipendentemente dalla loro funzione in opera), prodotti ceramici (quali laterizi e cotti) ottenuti partendo dai materiali naturali attraverso processi particolari di lavorazione.

All'attività di normazione della Commissione (sotto forma di raccomandazioni, non avendo l'autorità di proporre standard) parteciparono, fin dalla sua istituzione, specialisti di diversa appartenenza: esperti e ricercatori del CNR e del Ministero per i Beni Culturali ma anche docenti universitari, liberi professionisti (progettisti, scienziati in conservazione e restauratori), rappresentanti delle industrie interessate al settore, per un totale di circa 200 componenti, suddivisi in Gruppi e Sottogruppi di lavoro, ciascuno specializzato nelle diverse discipline scientifiche che aderiscono al settore conservativo (chimica, biologia, fisica, geologia, ecc.) o in classi particolari di materiali (malte, prodotti ceramici, ecc.) o, infine, in problematiche particolari (documentazione grafica, stato igrometrico delle strutture, ecc.).

La metodologia impiegata è già stata ampiamente e positivamente testata in numerose cinte murarie italiane, quali a titolo di esempio, le mura rinascimentali di Urbino[1]

---

[1] Busdraghi P., Vannucci S., Veneri F. (1992). Le materie prime utilizzate in epoca rinascimentale per la fabbricazione dei mattoni della cinta muraria di Urbino. In: "Le superfici nell'architettura: il cotto. Caratterizzazione e trattamenti". Atti Conv. Scienza e Beni Culturali, Bressanone.

Vannucci S., Busdraghi P., Cruciani Fabozzi G., Micheli L., Ugolini A. (1992). Caratteristiche tecnologiche e comportamento fisico dei diversi tipi di mattone costituenti alcune unità stratigrafiche della cinta muraria di Urbino. In: "Le superfici nell'architettura: il cotto. Caratterizzazione e trattamenti". Atti Conv. Scienza e Beni Culturali, Bressanone.

Busdraghi P. Veneri F. (1994). Le tre cinte murarie di Urbino – Aspetti stratigrafici e morfologici del "poggio" e caratterizzazione petrografica dei materiali da costruzione. Tema, Angeli ed.

Busdraghi P., Gori U., Polidori E., Tonelli G., Veneri F. (1994). The three City Walls of Urbino: stability and state of conservation. Proceedings of "III International Symposium on the Conservation of Monuments in the Mediterranean Basin".

Busdraghi P., Veneri F. (2003). I materiali lapidei impiegati in Urbino nell'antichità: i travertini. Atti I° Convegno Nazionale AIGA, Chieti.

Le ricerche bibliografiche e d’archivio, condotte dal Gruppo di Lavoro, coordinate dall’Arch. Paola Raggi, hanno consentito di inquadrare l’Opera architettonica in studio dal punto di vista delle fasi costruttive diacrone, così da permettere l’individuazione delle porzioni di Mura costruite in differenti epoche storiche. È stata quindi fatta una macro suddivisione della cinta muraria in cui sono state individuate:

1. la Rocca Roveresca: fine ‘400;
2. le mura cinquecentesche: antica cinta pentagonale (l’unico esempio italiano ancora presente è rappresentato dalla fortificazione di Peschiera del Garda) costruita secondo uno schema molto diffuso nell’architettura militare dell’Italia rinascimentale che prevedeva murature più spesse e la costruzione di baluardi in risposta alla recente scoperta della polvere da sparo (altri esempi sono le Mura di Legnago e Pesaro);
3. mura settecentesche: testimoniano il passaggio da città - fortezza (concezione cinquecentesca) a città commerciale, con particolare riferimento all’importanza assunta dalla Fiera della Maddalena.

Sono inoltre presenti porzioni di rifacimento delle Mura, attribuite all’ ’800 - inizi del ‘900 (si ricordi a tal proposito che il terremoto del 1930 distrusse gravemente parte della città), che tuttavia non sono state considerate dal presente studio, in quanto non si tratta di nuove edificazioni ma di interventi e modifiche su opere preesistenti.

Più in dettaglio si individuano:

- **la Rocca Roveresca**: posta a ridosso della fascia costiera adriatica, costruita tra il 1476 e il 1482 con funzione strategica contro le incursioni nemiche dal mare (invasioni dei Turchi) e anticamente circondata da un fossato;
- **le Mura e il baluardo della Penna/di San Sebastiano** (dal nome del torrente Penna, prosciugato nel 1920 per motivi igienici): questo baluardo fu il primo ad essere edificato nel corso della fortificazione pentagonale cinquecentesca nel 1546;
- **il Fortino e il Foro annonario**: il primo iniziato nel 1557 e il secondo risalente al XIX secolo;
- **le Mura e il Baluardo del Porto**: la cui edificazione, iniziata nel 1574, rappresenta l’ultima parte delle Mura cinquecentesche, aprendo la strada allo sviluppo della città al di là del Fiume Misa;

- **le Mura e i baluardi del Portone e della Posta** (quest'ultimo non più presente): risalenti al '700 e parzialmente restaurati;
- **le Mura e il baluardo di San Martino** (ingresso di Via Pisacane): edificato nel '500 e modificato nel '700 e poi nell'800 (ora sede di un Museo).

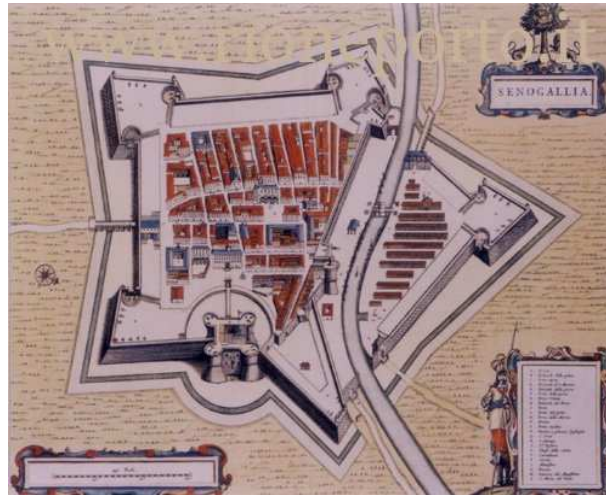



Fig.1 Pianta della città di Senigallia attribuita a J. Blaeu (1660, Senigallia, Biblioteca Comunale Antonelliana). È chiaramente visibile la struttura pentagonale della fortificazione cinquecentesca.

Sulla base di questa suddivisione, si è proceduto ad una ricognizione fotografica dell'architettura in studio, che, per prima cosa, ha permesso di mettere in evidenza situazioni di forte degrado fisico-chimico del manufatto (figg. 2-10).

Fig.2 Baluardo della Penna. Tratto di Mura parzialmente restaurato, ma già interessato da fenomeni di degrado (formazione di "patina" grigio-scura verosimilmente legata alle emissioni dei gas di scarico del traffico veicolare dell'antistante parcheggio).

Fig.3 Baluardo della Penna. A sinistra particolare relativo ad una pianta di alloro infestata da cocciniglia; sono presenti due piante addossate alle Mura interessate da questo parassita, le cui fumaggini contribuiscono al degrado delle Mura, con formazione di una patina nera; a destra esemplari di cocciniglia (Coccoidea, Handlirsch, 1903).

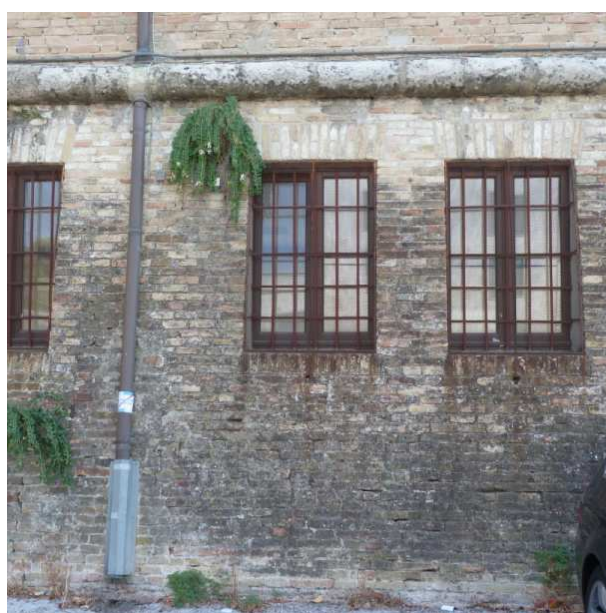



Fig.4 Baluardo della Penna. Mura cinquecentesche che delimitano il parcheggio nei pressi del Comune, coperte da patina nera.

Fig.5 Mura cinquecentesche contigue al Baluardo della Penna. Al degrado chimico sopra descritto si aggiunge l'azione fisico-meccanica delle piante infestanti (capperi selvatici) lungo i giunti.

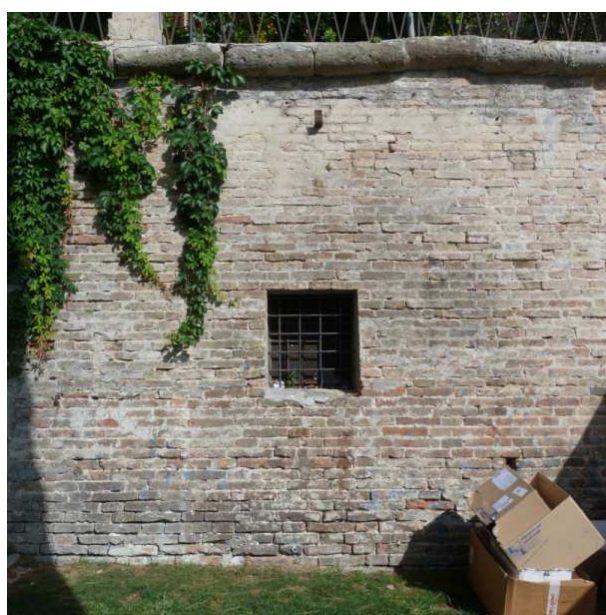



Fig.6 Mura cinquecentesche nei pressi dei Giardini Catalani. Sono osservabili fratture con conseguente scompaginazione del "toro".

Fig.7 Mura settecentesche in prossimità di Porta Colonna: nelle foto sono visibili fenomeni di scalzamento al piede della cortina di laterizi e delle conseguenti fratture verticali; si noti l'utilizzo a parcheggio a ridosso delle Mura.

Fig.8 Mura settecentesche del Baluardo del Portone. Esempio di restauro non conservativo.

Fig.9 Mura cinquecentesche presso il Baluardo della Penna. Mura infestate oltre che da specie arbustive anche da specie arboree come il fico (immagine a sinistra) e la noce vomica (immagine a destra).

Fig.10 Mura cinquecentesche nel quartiere Porto fortemente degradate e rese inaccessibili al pubblico da recinzioni.

Sono quindi stati scelti, sia nelle mura cinquecentesche sia in quelle settecentesche, dei tratti, individuati con un codice numerico, per le prime stazioni di campionamento, indicando quest'ultime con un codice alfanumerico del tipo Px, *con x variabile da 1 a 16*; sono state quindi prelevate le malte nelle parti più rappresentative dei vari tratti (ad eccezione di tratti non "studiabili" per motivi logistici come presso il Monastero delle Benedettine, fig. 11, la Caserma della Polizia di Stato e il Ricovero per Anziani), delimitando tali aree campione (ove possibile in campiture di dimensioni 1m x 1m) con delle "bandierine" colorate ed effettuando anche più di un

campione all’interno dello stessa campitura. E’ inoltre da sottolineare che i prelievi sono stati eseguiti sia all’interno dei giunti dei paramenti, sia, data la caratteristica struttura a sacco delle Mura di Senigallia (Cfr. fig. 12), all’interno della struttura muraria. Ciò è stato possibile in quanto alcuni contrafforti o porzioni di Mura sono risultate “tagliati” (ad esempio presso Porta Lambertina, fig.13).

Fig.11 Mura settecentesche viste dall’interno del Monastero delle Benedettine.

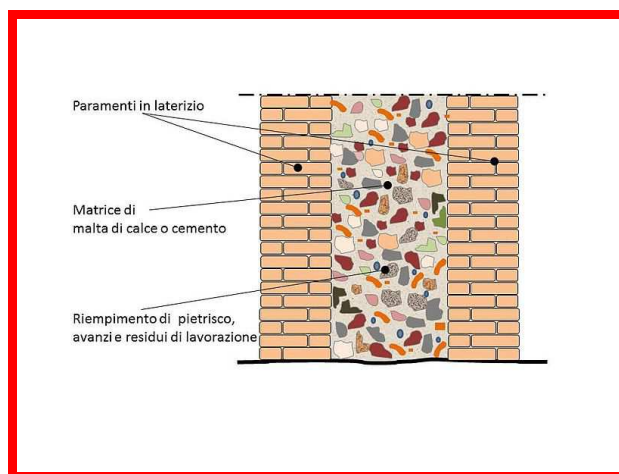



Fig.12 Caratteristica struttura a sacco delle Mura visibile presso la Rocca Roveresca.

Fig. 13 Tratto di mura cinquecentesche tagliate e inglobate nella Porta Lambertina, viste in sezione e frontalmente.

Le indagini hanno avuto i seguenti scopi principali:

a) caratterizzare in modo completo, sotto I'aspetto composizionale, strutturale e fisico i diversi materiali lapidei, individuando nel contempo le caratteristiche tecnologiche delle malte;

b) individuare le cause e i processi fondamentali di degradazione in atto su tali materiali, nelle diverse parti, e valutarne di conseguenza gli stati di conservazione;

c) definire, sulla base dell'insieme dei dati raccolti e di opportune esperienze di laboratorio, i più idonei ed efficaci interventi conservativi, indicando i prodotti e i materiali da utilizzare per ogni singolo intervento.

Oltre a questi obiettivi, sono state ricercate le possibili relazioni fra tipi di manufatto ed epoche di messa in opera, quale contributo alle ricerche di carattere storico.

È da precisare che i risultati riportati nel presente elaborato costituiscono la base di partenza per studi più approfonditi dei materiali costituenti le Mura senigalliesi. Andranno quindi integrati con ulteriori indagini e prove di laboratorio.

2. INDAGINI EFFETTUATE

Di seguito vengono brevemente descritte le analisi ed esperienze effettuate e le modalità di prelievo e preparazione dei singoli campioni.

2.1. LATERIZI

Chi scrive ha organizzato nel corso di decenni di analisi e prove eseguite sui materiali lapidei, una banca dati relativa ai laterizi, inerente le analisi di laboratorio, le geometrie e la cromia dei singoli manufatti. Ciò ha permesso di ritenere superfluo, *in primis*, data l'analogia storico-architettonica dell'apparecchio murario in oggetto con le altre Mura storiche già studiate, la ricerca analitica completa dei campioni di laterizio in opera nei tratti campione. In essi si è quindi proceduto alla sola misurazione delle dimensioni (L, l, h) e alla relativa analisi cromatica degli stessi in 16 stazioni di campionamento (tav. 1); in tab. 1 vengono riportati i valori medi e i risultati dell'analisi cromatica delle colorazioni predominanti eseguita con l'impiego delle tavole Munsell (fig. 14), nonché, i diversi tessuti murari riconosciuti nei quali prevale la "tessitura Gotica/Polacca" (fig. 15). La presenza di mattoni a differente colorazione (rossi, gialli e subordinatamente grigi) è presumibilmente legata, come dimostrato da studi eseguiti in passato (V. nota 1), alle diverse temperature negli antichi forni di cottura, generalmente temporanei, edificati in prossimità della fabbrica. Ciò in genere è riferibile a fenomenologie legate alla non uniforme distribuzione delle temperature all'interno del forno (temperatura crescente spostandosi dai mattoni rossi, ai gialli, fino ai grigi, dove inizia un processo vero e proprio di vetrificazione).

Dimensioni laterizi omogenee e con poche differenze tra '500 e '700 (i valori sono espressi in cm):

Laterizio del '500: L=30,6; h=5,5; l=14,2; Giunti h=1,6; Giunti v=1,2

Laterizio del '700: L=31,4; h=4,7; l=15,2; Giunti h=1,1; Giunti v=0,9

Colorazioni predominanti per i laterizi: giallo (10YR7/4-*Very pale brown*) e rosso (10R5/6 & 2.5YR5/6-*Red*); mura settecentesche con maggior numero di laterizi gialli

Tab. 1 Valori medi delle dimensioni dei laterizi per le Mura cinquecentesche e settecentesche.

Fig. 14 Tavole Munsell.

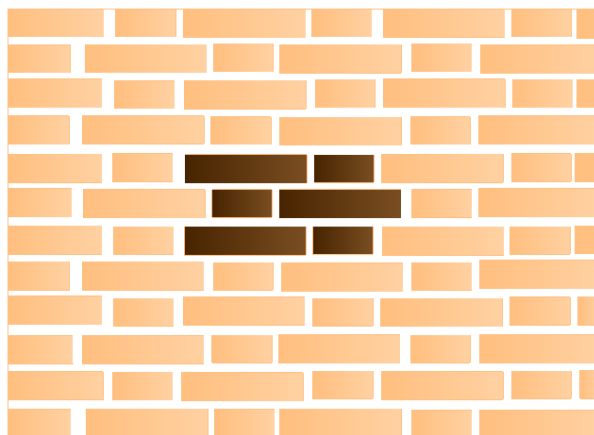



Fig. 15 Tessitura Gotica o Polacca (alternanza in orizzontale mattone lungo-corto-lungo).

Per ogni tratto individuato (16 tratti) sono state identificate una o più stazioni di campionamento, generalmente 1 m x 1 m (fig. 16), entro le quali sono stati prelevati i campioni di malta successivamente analizzati in laboratorio.

Fig. 16 Esempio di stazione di campionamento 1 m x 1 m delimitata da bandierine colorate per il tratto P4.

Di seguito si riporta l'elenco delle stazioni di campionamento con le relative descrizioni (tab. 2).

Tab. 2 Elenco e descrizione della muratura nelle diverse stazioni.

Epoca	**Numero stazione**	**Descrizione**
'500	P1	Mattone rosso - *2.5 YR 7/3 (light reddish brown); 2.5 YR 5/6 (red); 2.5 YR 6/6 (light red)* - (L=30,5 l=13,9 h=5,5 cm); Mattone giallo - *2.5 Y 7/3 (pale yellow); 2.5 Y 7/4 (pale yellow); 10 YR 7/4 (very pale brown)* - (L=30,9 l=14,1 h=5,3 cm); Giunti orizzontali 2 cm; Giunti verticali 2,4 cm. Predominano i laterizi; sono presenti anche parallelepipedi di pietra da regolari a irregolari, di probabile reimpiego, in arenite (prevalentemente giallastra, grossolana e mediamente cementata, anche se non mancano quelle di colore dal grigio-giallastro all'ocraceo). Il legante è rappresentato da malta di calce idrata ed aggregati medio-grossolani. Gli aggregati medio-grossolani sono perlopiù ghiaie di origine fluviale di colore grigio-biancastro. Il riempimento di questa muratura interna si configura come semi-ordinato con materiali lapidei vari. I laterizi sono decisamente prevalenti rispetto alla pietra e la percentuale di malta si aggira intorno al 20% volendo fare una stima approssimativa. Sono stati individuati molti residui di intonaco che fanno pensare ad un muro un tempo interamente coperto.
'500	P2	Mattone rosso - *10 R 5/6 (red)* - (L=29,9 l=13,5 h=5,4 cm); Mattone giallo - *2.5 Y 6/4 (light yellowish brown)* - (L=31,5 l=14,3 h=5,4 cm); Giunti orizzontali 1,1 cm; Giunti verticali 0,5 cm.

		Quello studiato rappresenta un tratto di Mura realizzato con la tecnica Gotica e ammorsamento anche se, muovendosi lungo la verticale si rinvengono alternanze di file di mattoni lunghi e file di mattoni corti. In questo tratto manca del tutto la componente lapidea, mentre abbondano laterizi a colorazione prevalentemente gialla (circa il 90% del totale) e di forma a tratti irregolare. Il muro risulta fortemente degradato e, in particolare, coperto da una patina nerastra oltre che da licheni. La malta è inoltre quasi del tutto scalzata e ove presente riempie giunti orizzontali di spessore esiguo che vanno dai 0,5 cm ai 2 cm e verticali più omogenei di 0,5 cm. A 2,5-3,0 m di altezza si individuano punti adatti a possibili prelievi futuri di campioni di malta meno disturbati e quindi di migliore qualità.
'500	P3	Mattone rosso - *10 R 4/6 (red); 2.5 YR 5/6 (red); 5 YR 6/4 (light reddish brown)* - (L=30,6 l=14,4 h=5,7 cm); Mattone giallo - *10 YR 5/4 (yellowish brown); 10 YR 7/4 (very pale brown)* - (L=30,7 l=14,4 h=5,6 cm); Giunti orizzontali 2 cm; Giunti verticali 1,2 cm. In questa stazione, posta a destra della stazione P4, si ha una predominanza di mattoni rossi che risultano più puliti che in P4 tranne che nella porzione sommitale delle Mura. I mattoni si presentano quindi in buono stato seppure presentino alcuni forellini; in alcuni punti si osserva anche l'interposizione di spezzoni di laterizi per riempire i giunti. Scarsa è invece la quantità di malta presente; in alcuni tratti si osserva anche del cemento oltre alla malta originaria. In passato sono stati quindi eseguiti interventi di consolidamento e prelievi (presenza di chiodi preesistenti).
'500	P4	Mattone rosso - *2.5 YR 5/6 (red); 10 R 6/4 (pale red)* - (L=30,7 l=14,6 h=5,8 cm); Mattone giallo - *10 YR 7/4 (very pale brown)* - Giunti orizzontali 2,1 cm; Giunti verticali 1,3 cm. La parte più a destra delle Mura, e quindi prossima al Comune, risulta parzialmente stuccata anche se in modo poco accurato, tanto che sono ben visibili schizzi di cemento asciugato fuori dai mattoni. È interessante notare la cospicua presenza di piante di capperi selvatici che sembrano essersi impadronite del monumento. I mattoni sono prevalentemente rossi ed è curioso osservare come essi siano sporchi in alto e al centro mentre risultino puliti nella parte più bassa. Manca del tutto materiale lapideo. In molti punti i giunti hanno perso la malta.
'500	P5	Mattone rosso - *10R 5/6 (red); 2.5 YR 6/4 (light reddish brown)* - (L=31,4 l=14,3 h=5,5 cm); Mattone giallo - *2.5 Y 7/4 (pale yellow); 2.5 Y 7/3 (pale yellow)* - (L=30,9 l=14,3 h=5,6 cm); Giunti orizzontali 1,8 cm; Giunti verticali 1,4 cm. Tratto di Mura realizzato con la tecnica gotica o alternanza laterizio lungo - lungo - corto o corto – corto - ungo in alcuni tratti. Si osserva la presenza di intonaco nella parte a destra, più vicina al Comune, mentre si hanno solo delle tracce di questo nella parte a sinistra, il che fa pensare ad un muro un tempo interamente coperto da destra a sinistra. La malta tra i giunti è presente in alcuni tratti (per il 50% circa secondo una stima approssimativa): essa risulta molto friabile, almeno per quanto concerne la porzione più superficiale (facilmente intaccata dai chiodi) e composta da ciottoli eterometrici e arrotondati per quanto riguarda la frazione inerte. La muratura è costituita interamente da laterizi rossi e gialli (i primi presenti in porzione leggermente maggiore). Sono state osservate alcune piante rampicanti, parzialmente responsabili del degrado del tratto di Mura in

		questione.
‘500	P6	Mattone rosso - *10 R 4/6 (red); 10 R 5/6 (red); 2.5 YR 6/4 (light reddish brown)* - (L=29,8 l=14,0 h=5,9 cm); Mattone giallo - *10 YR 6/3 (pale brown); 2.5 Y 5/3 (light olive brown)* - (L=30,0 l=14,5 h=5,7 cm); Giunti orizzontali 1,3 cm; Giunti verticali 0,9 cm. Si rinvengono alcune tracce di intonaco. I mattoni presenti sono principalmente rossi (circa l’80%), mentre manca del tutto materiale lapideo. La malta risulta ancora presente in molti punti ed è in buono stato, di colore grigio chiaro e contiene ciottoli di dimensioni ridotte e forma arrotondata. Anche i mattoni risultano in buono stato e questo è ben evidenziato dalla presenza di mattoni di colore rosso ancora molto acceso (cosa che non si verifica in altri punti dove, anzi, si fa difficoltà a riconoscere mattoni gialli e mattoni rossi ingialliti dal tempo; probabilmente ciò è legato al fatto che questo tratto di mura si affaccia sui giardini e non su un’area di parcheggio o peggio ancora di transito dei veicoli motorizzati. Sono presenti alcune piante infestanti, anche se, fortunatamente, in percentuale molto ridotta. È da notare, però, che sebbene non vi siano indici di forte degrado chimico, molti mattoni risultano fratturati, segnale questo, molto probabilmente, di una cattiva risposta agli stress meccanici.
‘500	P7	Porzione di muro “tagliata” in cui si osserva la caratteristica struttura a sacco con riempimento in mattoni e pietre arenacee; la malta risulta ottimamente conservata; la porzione sommitale ha già subito interventi di restauro.
‘500	P8	Porzione di muro “tagliata” all’ingresso del teatro “La Fenice”; sono visibili pietre nella parte interna grazie alla tipica struttura a sacco. Ottimo stato di conservazione della malta.
‘700	P9	Mattone rosso - 2.5 YR 5/4 *(reddish brown);* 10 R 5/6 *(red);* 2.5 YR 6/6 *(light red)* - (L=32,4 l=15,7 h=4,7 cm); Mattone giallo - *10 YR 7/4 (very pale brown); 7.5 Y 7/4 (pink)* - (L=31,7 l=15,8 h=4,6 cm); Giunti orizzontali 0,9 cm; Giunti verticali 0,5 cm. Passaggio da Mura cinquecentesche a settecentesche all’ingresso di via Piasacane (lato destro). I mattoni risultano meno spessi e sono prevalentemente di colore giallo. Struttura a sacco con pietre; malta ben conservata. Dalle analisi al SEM si individua la presenza di una vera e propria patina di origine salina (NaCl).
‘700	P10	Mattone rosso - *5 YR 6/4 (light reddish brown); 10 R 5/6 (red); 2.5 YR 5/6 (red)* - (L=32 l=14,8 h=4,5 cm); Mattone giallo - *2.5 Y 8/3 (pale yellow); 10 YR 7/4 (very pale brown)* - (L=32,2 l=15,8 h=4,6 cm); Giunti orizzontali 1 cm; Giunti verticali 0,9 cm. Presenza di disomogeneità della muratura in questo tratto. Struttura simile ad architrave in pessimo stato e contenente pietre, che risultano invece assenti nella parte restante delle Mura per questo tratto (forse porzione ricostruità con una certa velocità in seguito ad un crollo). Mattoni rossi e gialli sono pressoché nella stessa percentuale. La malta è in condizioni abbastanza buone.
‘700	P11	Mattone rosso - *10 R 6/6 (light red); 10 R 5/6 (red); 2.5 YR 7/4 (light reddish brown)* - (L=31,4 l=14,6 h=4,5 cm); Mattone giallo - *10 YR 7/6 (yellow); 10 YR 7/4 (very pale brown)* - (L=31,8 l=14,2 h=4,2 cm); Giunti

		orizzontali 1,3 cm; Giunti verticali 1 cm; Pietre - *10 YR 6/2 (light brownish gray); 10 YR 6/3 (pale brown); 2.5 Y 7/2 (light gray) –* Presenza di arenarie con strutture trattive: le pietre costituiscono circa il 15 % del totale della muratura (lunghezza compresa tra 5 e 17 cm).
'700	P12	Mattone rosso - *10 R 6/4 (pale red); 2.5 YR 5/6 (red); 2.5 YR 6/6 (light red)* - (L=31 l=15,4 h=4,7 cm); Mattone giallo - *10 YR 6/3 (pale brown); 10 YR 7/4 (very pale brown); 2.5 Y 7/4 (pale yellow)* - (L=30,0 l=15,4 h=4,6 cm); Giunti orizzontali 1 cm; Giunti verticali 0,6 cm; Pietre - *10 YR 6/2 (light brownish gray); 10 YR 6/3 (pale brown); 2.5 Y 7/2 (light gray)* - Mattoni molto rovinati (presenza di fratture). In molti punti la malta è assente; dove presente questa risulta molto dura. Si ha una prevalenza di mattoni rossi (circa l'80 %). La malta è di colore grigio-scuro (molto sporca). Si individuano segni di scolo di catrame (patina nera sui mattoni).
'500	P13	Mattone rosso - *2.5 YR 5/8 (red); 2.5 YR 6/8 (light red); 5 YR 6/8 (reddish yellow)* - (L=31 l=15,5 h=4,5 cm); Mattone giallo - *2.5 Y 6/4 (light yellowish brown)* - (L=30,0 l=14,3 h=5,3 cm); Giunti orizzontali 1,3 cm; Giunti verticali 1,3 cm; Pietre - *10 YR 6/2 (light brownish gray); 2.5 Y 6/3 (light yellowish brown); 2.5 Y 6/4 (light yellowish brown)* - Tratto di Mura "tagliato" presso Porta Lambertina con la caratteristica struttura a sacco. Ottimo stato di conservazione della malta. Pi individuano molti elementi in pietra (arenarie) che sono pari a circa il 60 %. I mattoni sono anneriti a causa dell'alterazione legata all'azione di agenti meteorici.
'500	P14	Pietre - *5 Y 6/3 (pale olive); 5 Y 6/3 (pale olive)* – (Base=30,8; Altezza=14,0) Muratura composta solo da pietre (arenarie ma anche pietre calcaree biancastre). Malta in pessimo stato e assente in molti punti. I blocchi in pietra presentano forme molto variabili ma comunque elevate. Area in condizioni di abbandono totale e ad accesso bloccato. Presenza di vegetazione infestante.
'500	P15	Mattone rosso - *10 YR 6/2 (light brownish gray); 7.5 YR 6/3 (light brown)* - (L=30,0 l=14,3 h=5,6 cm); Mattone giallo - *5 Y 6/3 (pale olive); 5 Y 6/4 (pale olive)* - (L=30,0 l=14,0 h=5,5 cm); Giunti orizzontali 1,4 cm; Giunti verticali 0,9 cm. Mura zona Rocca. Mattoni gialli prevalenti anche se si individuano alcuni grandi blocchi di pietra isolati. La malta è presente quasi ovunque. I mattoni risultano molto degradati (patina nera ovunque). Si individuano delle piante infestanti, muschi e licheni (problema legato all'umidità).
'500	P16	Mattone rosso - *5 YR 7/4 (pink); 5 YR 5/6 (yellowish red*) - (L=32,4 l=14,4 h=5,7 cm); Mattone giallo - *2.5 Y 7/3 (pale yellow); 2.5 Y 7/4 (pale yellow)* - (L=31,7 l=14,5 h=4,9 cm); Giunti orizzontali 1,4 cm; Giunti verticali 1,1 cm. Malta sporca (presenza di macchie nere); Struttura a sacco con mattoni (soprattutto gialli) e pietra.

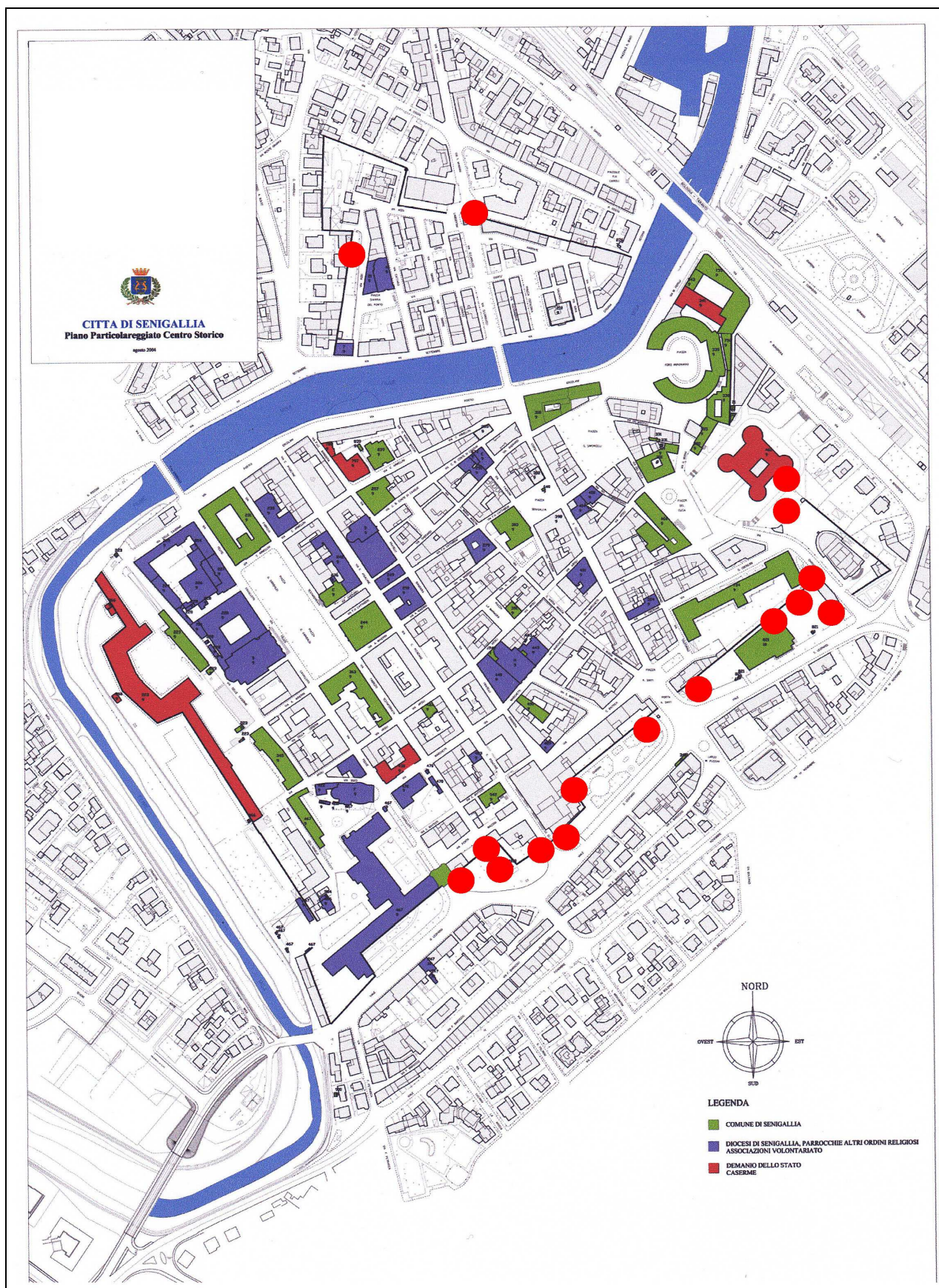
2.2. MALTE

Le malte rappresentano, per loro natura, gli elementi di minore resistenza di una muratura. In particolare, studi condotti da alcuni decenni in manufatti storici similari, hanno generalmente evidenziato doti fisico-meccaniche sempre molto scadenti e prossime ai limiti di rottura, oltre alla suscettibilità al degrado esogeno e/o antropico. Pertanto lo studio si è incentrato soprattutto sulla caratterizzazione di tali materiali.

Si è prestata quindi particolare cura nello studio delle malte, sia delle cortine sia del "sacco", per meglio definire, al contempo, le caratteristiche strutturali degli apparecchi e meglio individuare i corpi di fabbrica diacroni.

Nella tabella 3 sono riportati l'elenco e la descrizione schematica di tutti i campioni di malta prelevati, mantenendo distinti quelli del '500 da quelli del '700.

Mura '500		**Mura '700**	
P1	Baluardo della Penna (Scuola G. Pascoli)	P9	Ingresso via Pisacane
P2	Tratto vicino al comune, posto vicino al baluardo della Penna	P10	Mura del'700 del parcheggio fino a Porta Colonna esclusa
P3	Tratto vicino al comune, posto vicino al baluardo della Penna	P11	Mura del'700 del parcheggio fino a Porta Colonna esclusa
P4	Tratto vicino al comune, posto vicino al baluardo della Penna	P12	Mura del'700 del parcheggio fino a Porta Colonna esclusa
P5	Tratto a sinistra del comune		
P6	Giardini Catalani		
P7	Lato NE del museo		
P8	Ingresso museo		
P13	Porta Lambertina		
P14	Quartiere Porto		
P15	Zona Rocca		
P16	Zona Rocca (muratura interna)		

Tab. 3 Distinzione campioni Mura '500-'700.

Tav. 1 Ubicazione dei campioni prelevati.

Nella tav.1 sono riportate le ubicazioni dei campioni relativi alle due parti. Nella maggior parte dei casi a ciascun punto indicato corrisponde un campione di malta, prelevata ad una profondità, rispetto al piano del paramento murario, tale da garantire trattarsi di quella originaria.

2.3. PREPARAZIONE DEI CAMPIONI

In laboratorio, dai campioni di malta prelevati, sono state separate le parti destinate alle diverse indagini e precisamente:

- un'aliquota di polvere, rappresentativa dell'intero campione, ottenuta mediante macinazione in mortaio d'agata per I'analisi mineralogica e per le analisi chimiche (calcimetrie e future analisi diffrattometriche);

- una porzione molto piccola, per alcuni campioni, destinata alle indagini al microscopio elettronico a scansione (SEM);

- da tutti i campioni con sufficienti dimensioni e/o dotati di sufficiente coerenza (ricordando che comunque si tratta di malte e quindi di materiali che tendono a disgregarsi) sono stati preparati dei provini con una delle superfici appiattita per le esperienze di imbibizione in acqua per risalita capillare;

- per la maggior parte dei campioni sono state eseguite prove di tipo fisico-meccanico come il PLT *(Point Load Test*), prove con picnometro per la determinazione del peso specifico (γ_s) e del peso dell'unità di volume (γ_d).

3. DETERMINAZIONE DEI PARAMETRI FISICI

Utilizzando i provini di piccole dimensioni, sono stati determinati i seguenti parametri fisici: peso specifico reale (γ), peso specifico apparente o peso di volume (γ_s) e porosità totale (P). Le determinazioni sono avvenute, previo essiccamento a temperatura ambiente (tra il prelievo dei campioni e l'esecuzione di tali prove sono trascorsi infatti diversi mesi), tramite la misura diretta dei pesi e dei volumi reale e apparente. I volumi sono stati misurati con picnometri di precisione con sensibilità di 0,005 cm^3. In assenza di macropori la porosità ottenuta è quella totale,

altrimenti, data la metodologia adottata, corrisponde alla porosità con vuoti inferiori a qualche decina di micron.

3.1. POINT LOAD TEST (PLT) – PROVA DI CARICO PUNTUALE

Si tratta di una prova a carico concentrato (puntuale), che fornisce un indice di resistenza del materiale.

Fig.17 Strumentazione per l'esecuzione del Point Load Test (PLT): il campione di malta viene posto nello spazio tra le punte coniche in modo che L risulti perpendicolare alla direzione di applicazione del carico.

Essa può riguardare:

- Elementi di forma regolare (prova assiale e diametrale su spezzoni di carota)
- Blocchetti e spezzoni irregolari (come nel caso dei campioni di malta)

Il valore che si ricava dalla prova è il *Point Load Strenght Index*, $Is_{(50)}$, indice di resistenza ad un carico puntuale, che può essere correlato con la resistenza a compressione monoassiale.

Operativamente vengono prese le misure del provino (L, l, h) con un calibro; successivamente il provino viene collocato nell'attrezzatura (fig. 17) portando le punte coniche a contatto con la dimensione minore del campione che è la distanza D_0. Viene quindi incrementato il carico uniformemente in modo tale che la rottura del provino avvenga in 10-60 secondi: si annotano il valore del carico di rottura P e la nuova distanza D tra le punte (la superficie di frattura deve passare attraverso entrambi i punti di carico). Si calcola la resistenza al punzonamento **$Is = P/D_e^2$** dove:

- $D_e^2 = 4 A/\pi$
- $A = l*D$

Nel caso in cui i campioni siano di ridotte dimensioni i valori ottenuti vanno così corretti:

$$Is_{(50)} = F*Is$$

con F fattore correttivo di forma = $(D_e/50)^{0.45}$

Per il calcolo della resistenza alla compressione uniassiale si ricorre alla seguente relazione empirica:

$$Su = 24*Is_{(50)}$$

Di seguito vengono riportati i risultati delle prove condotte sui campioni irregolari di malta, tab. 4.

Campione	l_{medio} (mm)	D (mm)	P (kN)	P (N)	D_e^2 (mm)	D_e (mm)	I_s (Mpa)	F	$I_{s(50)}$ (Mpa)	$Su=24*Is_{(50)}$ (Mpa)
P1s	55,225	43	1,9	1900	3023,53	54,99	0,63	1,044	0,66	15,74
P2g	13,7	8	0,05	50	139,55	11,81	0,36	0,522	0,19	4,49
P5/1g	15,79	15	0,2	200	301,52	17,36	0,66	0,621	0,41	9,89
P6g	17,2	8	1,1	1100	175,2	13,24	6,28	0,550	3,45	82,86
P7s a	20,46	18	0,4	400	468,97	21,66	0,85	0,686	0,59	14,05
P7s b	20,81	10,5	0,1	100	227,27	15,08	0,44	0,583	0,26	6,16
P8s	20,86	23	1,4	1400	600,33	24,50	2,33	0,725	1,69	40,60
P9s a	27,07	10	0,9	900	383,88	19,59	2,34	0,656	1,54	36,91
P9s b	14,23	20	0,15	150	266,11	16,31	0,56	0,604	0,34	8,17
P11/1g	22,76	13	0,05	50	319,46	17,87	0,16	0,629	0,10	2,36
P11/2g	41,28	32	1,9	1900	1077,67	32,83	1,76	0,828	1,46	35,01
P13s	22,87	16	0,3	300	628,47	25,07	0,48	0,733	0,35	8,40
P14s	49,73	37	1,45	1450	2826,59	53,17	0,51	1,028	0,53	12,66
P15g	35,6	22	0,7	700	910,37	30,17	0,77	0,797	0,61	14,70
P16s	47,34	17,5	0,55	550	856,73	29,27	0,64	0,786	0,50	12,11

Tab. 4 Risultati del Point Load Test.

3.2. CALCIMETRIE

La calcimetria costituisce un'analisi chimica per la determinazione della % di carbonato di calcio ($CaCO_3$) presente nei diversi materiali da costruzione (quali ad esempio: intonaco, malta, tinteggiature, laterizi, pietre calcaree e silicee) o in terreni.

La prova calcimetrica viene effettuata facendo reagire con acido cloridrico (HCl) il materiale da analizzare. Lo strumento usato è il *calcimetro*, nel nostro caso quello di Dietrich-Fruhling (fig. 18) nel quale viene inserita una quantità nota di campione finemente macinato (quantità legata alla temperatura e alla pressione registrati al momento della prova). Si aggiunge quindi l'acido cloridrico, miscelato con acqua deionizzata, il quale, attaccando il carbonato di calcio eventualmente presente nel campione, sprigiona anidride carbonica, secondo la seguente reazione chimica:

$$CaCO_3 + 2HCl \rightarrow CO_2 + H_2O + CaCl_2$$

L'anidride carbonica così sviluppata comprime l'acqua presente in uno dei tubi comunicanti dello strumento e in base all'abbassamento della colonna d'acqua, misurato in ml su una buretta graduata da 0 a 200 ml, si ricava la % di $CaCO_3$ presente nel campione in base alla seguente relazione:

$$(X + Y)/2$$

Dove:

X= cc di anidride carbonica sviluppata ricavati dalla buretta graduata

Y= fattore di correzione legato ai cc di anidride carbonica sviluppata

Di seguito vengono riportati i risultati delle analisi condotte, (tab. 5 e fig. 19), che evidenziano un'elevata percentuale di carbonato di calcio per tutte le malte studiate (superiore al 50%), mentre tale valore scende notevolmente quando si tratta di laterizi (campione P3lat: solo il 17,10 % di $CaCO_3$).

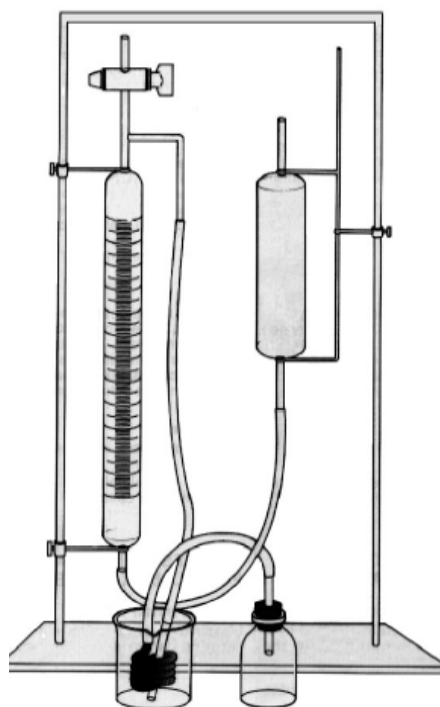
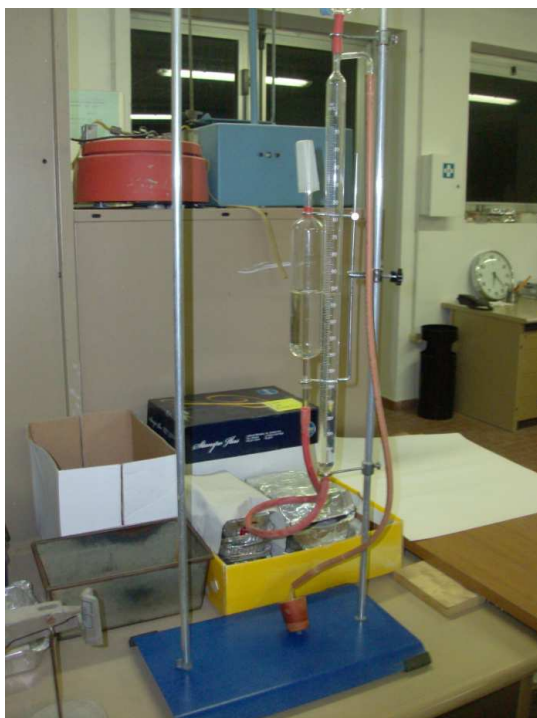



Fig. 18 Calcimetro di Dietrich-Fruhling.

Campione	Temperatura (°C)	Pressione (mm Hg)	Massa campione (g)	Acido carbonico sviluppato (cc)	Fattore di correzione	Percentuale carbonato di calcio %
P13s	18	753	0,8128	111	6,194	58,60
P8s	18	753	0,8128	102	6,068	54,03
P3g	18	753	0,8128	108	6,152	57,08
P2g	18	753	0,8128	98	6,003	52,00
P1s	18	753	0,8128	97	5,985	51,49
P10g	18	750	0,8106	128	6,432	67,22
P6g	18	750	0,8106	109	6,166	57,58
P5/2g	18	750	0,8106	98	6,003	52,00
P7s	18	750	0,8106	112	6,208	59,10
P14s	18	750	0,8106	100	6,04	53,02
P9s	18	750	0,8106	92	5,89	48,95
P16s	18	750	0,8106	109	6,166	57,58
P15g	18	750	0,8106	100	6,04	53,02
P12g	18	750	0,8106	121	6,334	63,67
P5/1g	18	750	0,8106	101	6,054	53,53
P3lat	18	746	0,8062	30	4,205	17,10
P11/1g	18	746	0,8062	102	6,068	54,03
P1s (crosta)	18	746	0,8062	88	5,812	46,91
P1s	18	746	0,8062	113	6,222	59,61

Tab. 5 Risultati delle Calcimetrie eseguite.

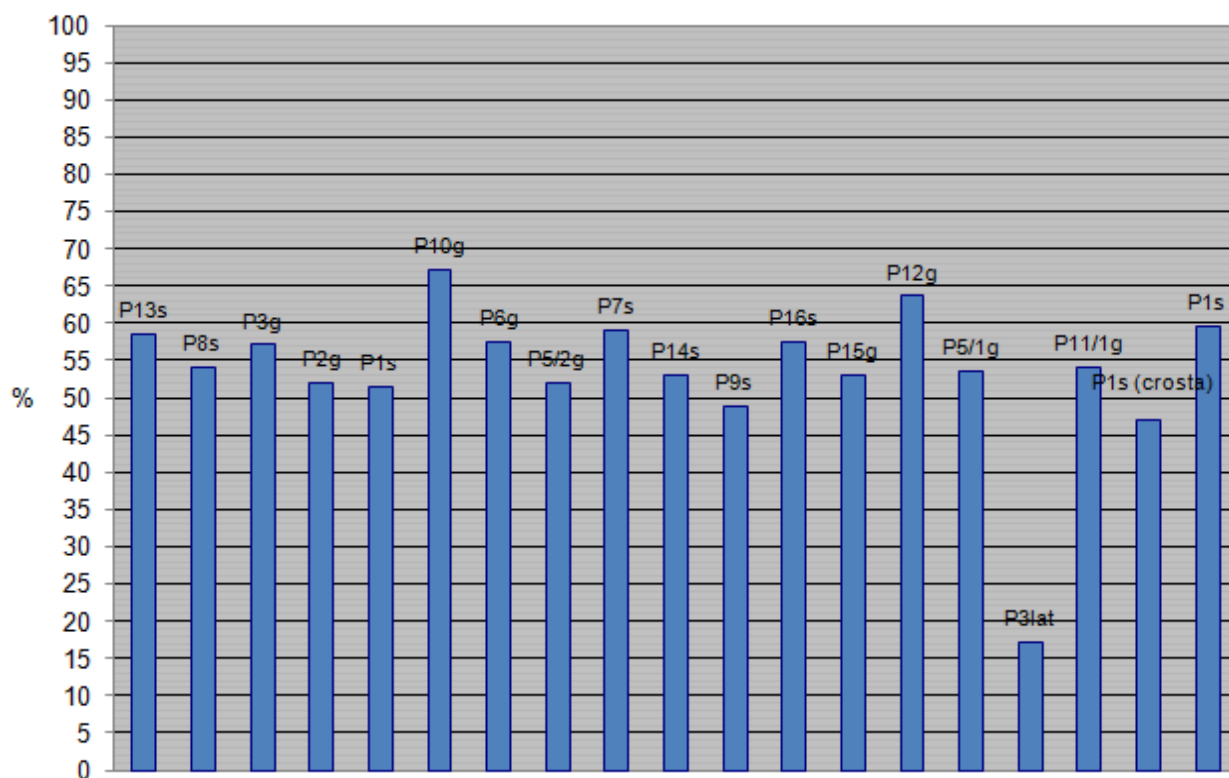



Fig. 19 Risultati in percentuale delle prove calcimetriche eseguite in laboratorio.

3.3. PESO DI UNITÀ DI VOLUME (γ_D)

Per questo tipo di indagine è stato utilizzato un metodo innovativo, ma molto pratico, alternativo al classico volumometro a sabbia.

Sono state effettuate varie pesate:

- singolo campione
- contenitore cilindrico in acciaio (fig. 20) di dimensioni adeguate a quelle dei campioni studiati di volta in volta
- contenitore + sabbia (di densità nota)
- contenitore + sabbia + campione

Con volume del cilindro noto. È stato quindi calcolato il peso della sabbia equivalente e il suo volume che poi corrisponde al volume del campione.

Da qui è possibile utilizzare la relazione: **γ = Ws /V (g/cm^3)**

Di seguito vengono riportati i risultati delle analisi effettuate (tabb. 6-7; fig. 21)

Fig. 20 Cilindri in acciaio di diverse dimensioni per la determinazione del peso di unità di volume.

Campione	Peso campione (g)	Peso campione + sabbia + cilindro (g)	Peso cilindro + sabbia - peso campione (g)	Peso sabbia equivalente (g)	Vol sabbia=vol campione (cm^3)	γ_d (g/cm^3)
P1s	87,43	333,21	245,78	65,21	46,42	1,88
P5/1g	12,86	313,28	300,42	10,57	7,53	1,71
P8s	37,16	313,98	276,82	34,17	24,33	1,53
P9s	24,20	318,56	294,36	16,63	11,84	2,04
P11/1g	12,72	313,90	301,18	9,81	6,98	1,82
P11/2g	41,92	318,47	276,55	34,44	24,52	1,71
P13s	34,12	304,60	270,48	40,51	28,84	1,18
P14s	12,34	311,13	298,79	12,20	8,69	1,42
P15g	34,26	318,84	284,58	26,41	18,80	1,82
P16s	26,30	316,80	290,50	20,49	14,59	1,80

Tab. 6 Risultati delle prove eseguite sui campioni di dimensioni maggiori con le seguenti caratteristiche:

Tara cilindro = 33,09 g; peso cilindro + sabbia = 310,99 g; peso sabbia = 277,90 g; vol cilindro = 197,82; γ_d sabbia = 1,40 g/cm3.

Campione	Peso campione (g)	Peso campione + sabbia + cilindro (g)	Peso cilindro + sabbia - peso campione (g)	Peso sabbia equivalente (g)	Vol sabbia=vol campione (cm^3)	γ_d (g/cm^3)
P2g	2,52	61,57	59,05	54,72	1,72	1,47
P6g	2,32	61,12	58,80	54,47	1,97	1,18

P7s	4,00	62,12	58,12	53,79	2,65	1,51

Tab. 7 Risultati delle prove eseguite sui campioni di dimensioni minori con le seguenti caratteristiche:

Tara cilindro = 4,33 g; peso cilindro + sabbia = 60,77 g; peso sabbia = 56,44 g; vol cilindro = 40,06 cm3; γ_d sabbia = 1,41 g/cm3.

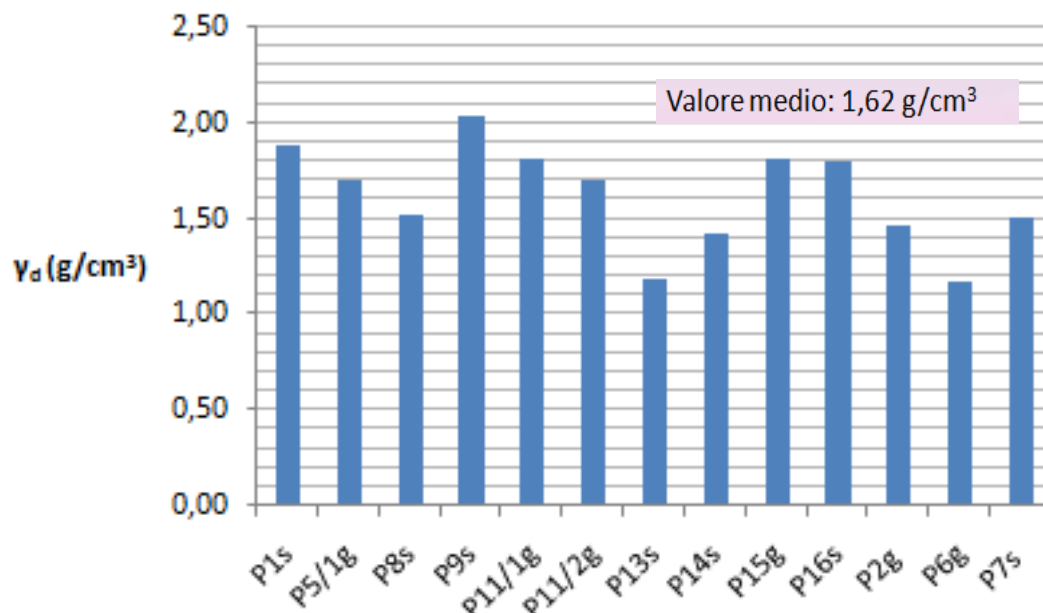



Fig. 21 Valore medio del peso specifico reale pari a 1,62 g/cm^3 ricordando che il metodo utilizzato ha un errore dell'ordine del 3% (valore trascurabile) e che le malte di calce e sabbia hanno un peso specifico intorno 1,7-1,8 g/cm3 (valori compatibili e leggermente ridotti dalla presenza di minerali di neoformazione per alterazione delle malte).

3.4. PESO SPECIFICO REALE (γ_S) E POROSITÀ (n)

Per questo tipo di indagine viene utilizzato il picnometro (fig. 22). Si tratta di un piccolo recipiente in vetro, chiuso da un tappo dotato di tubo capillare ed un riferimento per definire il livello di liquido costante. Il picnometro è, infatti, uno strumento usato per la determinazione del peso specifico di un materiale. La massa volumica è definita come rapporto tra la massa del campione e il volume dello stesso.

Fig. 22 Picnometro.

Si procede nel modo seguente:

- si misura la massa del picnometro riempito con acqua distillata ad una certa temperatura (ad esempio a 20°C) con l'ausilio di una bilancia di precisione ricavando $(Pp+H_2O)_{20°}$
- si misura la massa del picnometro (Pp)
- si misura la massa del campione polverizzato (in genere intorno ai 20-25 g) (Ps)
- si introduce il campione all'interno del picnometro e si fa una pesata (Pp+Ps)
- si riempie il picnometro con acqua
- dopo un lasso di tempo piuttosto lungo, necessario per l'espulsione del gas dal campione, si misura la massa del picnometro con il campione all'interno $(Pp+Ps+H_2O)_{misurato}$
- si calcola la differenza $(Pp+Ps+H_2O)_{20°C}$ - $(Pp+Ps+H_2O)_{misurato}$
- il valore ottenuto corrisponde al volume di acqua spostato e quindi al volume del campione
- si calcola γ_s **= massa/volume.**

In tab. 8 vengono riportati i dati delle analisi condotte.

Camp.	T (°C)	Pp (g)	Pp+H_2O (g)	Pc (g)	Pp+Pc+PH_2O (g)	γ_s (g/cm^3)
P1s	20	54,06	172,32	24,84	186,94	2,43
P16s	17,6	54,03	172,33	25,06	187,14	2,44
P13s	17,6	54,03	172,33	25,46	188,02	2,61
P8s	17,6	54,03	172,33	25,17	186,77	2,35

Tab. 8 Risultati delle prove con il picnometro.

A questo punto è possibile ricavare il valore della porosità (n), cioè il volume occupato dai pori rispetto al volume totale del materiale, attraverso la formula: *e/(1+e)%* dove *e* rappresenta l'indice dei vuoti, a sua volta ricavato dalla formula: $(\gamma_s/\gamma_d)-1$. Di seguito si riporta lo schema con i valori di porosità per i campioni studiati, fig. 23.

La porosità assume notevole importanza dal momento che si tratta di uno dei principali parametri legati al degrado dei materiali lapidei. Si può infatti osservare come materiali analoghi dal punto di vista chimico e mineralogico si possano alterare in modo differente a causa delle diversità nelle caratteristiche strutturali/tessiturali e di porosità.

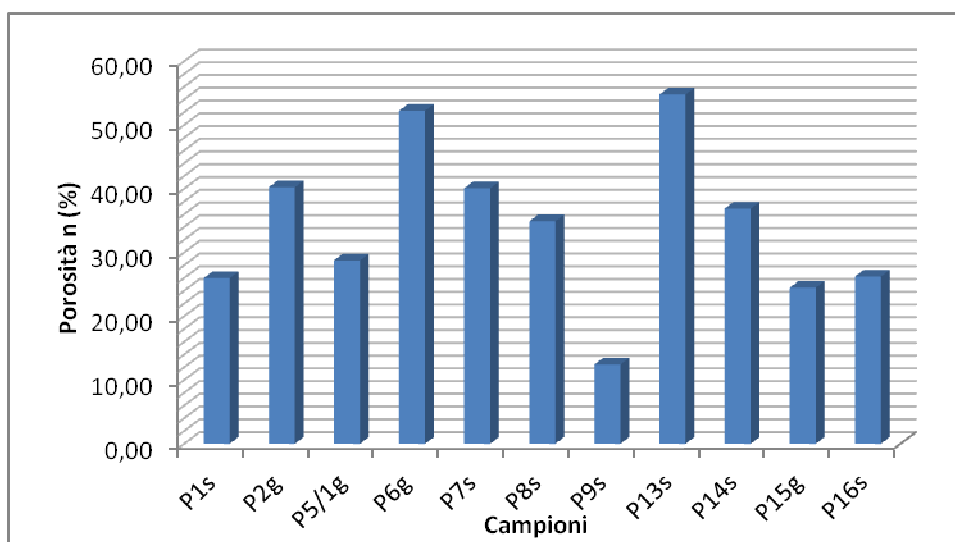



Fig. 23 Valori di porosità delle malte.

3.5. ESPERIENZE DI ASSORBIMENTO D'ACQUA PER RISALITA CAPILLARE

I fenomeni di assorbimento d'acqua che caratterizzano i materiali in esame sono stati indagati per assorbimento capillare su provini di dimensioni adeguate e con la superficie di contatto più regolare possibile. Da questo tipo di prova si ottengono curve di assorbimento molto utili, riportate tra gli allegati, che permettono di capire come un materiale lapideo assuma acqua con tale fenomenologia.

L’esperienza è stata effettuata ponendo a contatto una faccia del provino con un supporto assorbente mantenuto costantemente saturo di acqua deionizzata (fig. 24) Il provino è stato quindi pesato a intervalli di tempo prestabiliti: **1’, 3’, 5’, 10’, 15’,20’, 25’, 30’, 40’, 50’, 60’ (1h), 90’, 120’ (2h), 150’, 180’ (3h), 360’ (6h), 1440’ (24h), 2880’ (48h)** ricavando i seguenti parametri:

- C.I.p % *(Coefficiente d’imbibizione in peso) =* $[(P_t - P_0)/P_0] * 100$
- C.I.v % *(Coefficiente d’imbibizione in volume) = C.I.p% ** γd
- I.S. % *(Grado di saturazione) = C.I.v% / n.*

Con:

- P_t = Peso del campione misurato al tempo t
- P_0 = Peso iniziale del campione al tempo t = 0
- n = porosità.

Fig. 24 Campioni sottoposti a prova di risalita per assorbimento capillare; a sinistra campioni: P3lat, P1s, P16s, P8s, P15g, P14s; a destra: P6g, P9s, P5/1g, P13s, P7s, P2g.

4. MICROSCOPIA ELETTRONICA A SCANSIONE (SEM)

Il SEM - *Scanning electron microscope* - (fig. 25) permette di ottenere immagini tridimensionali ad alta risoluzione (~100 Å) mediante scansione di un fascio di elettroni in una piccola area del campione in esame. Tutti gli effetti che si producono nel punto di impatto del fascio possono essere utilizzati, tramite appositi rivelatori, per produrre contrasto, quindi l'immagine. Dall'analisi dei raggi X prodotti è anche possibile effettuare l'analisi composizionale ad alta risoluzione spaziale (microanalisi).

Si tratta di una tecnica molto versatile che trova applicazione sia in campo biologico che nella ***scienza dei materiali*** *ogni qualvolta si renda necessario visualizzare strutture a forte ingrandimento (da 10X a 100.000X)*

Le modalità di lavoro sono 3:

- ***High Vacuum***
- ***Low Vacuum***
- ***ESEM.***

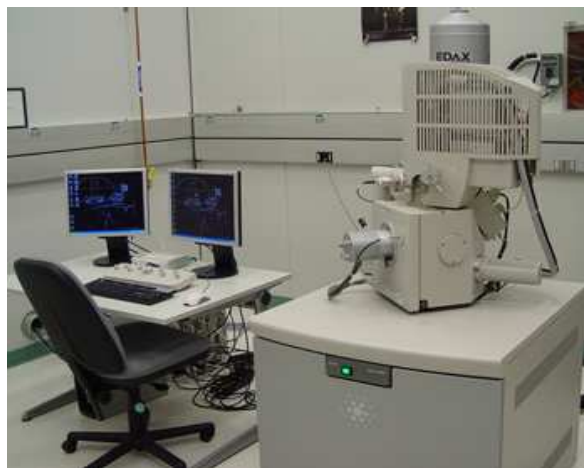



Fig. 25 Strumentazione SEM.

Nel nostro caso è stata utilizzata la modalità a basso vuoto con le seguenti caratteristiche:

- condizioni di basso vuoto con P = 0,60 Torr

- campioni non metallizzati
- distanza fissa del campione dal fascio di elettroni pari a 10 mm
- **elettroni back scattered:** cambiano i toni di grigio in base alla differente composizione chimica; gli elementi più pesanti sono quelli che appaiono più chiari
- **elettroni secondari:** permettono di vedere la morfologia
- **HV = 30 KV** Energia del fascio di elettroni pari a 30 kiloelettronvolts; l'energia utilizzata è pari a 3 volte il valore del picco dell'elemento. Abbassando il valore dell'energia ho informazione più dettagliata ma devo già conoscere cosa ho
- **Mag = 240 x** (Magnification = ingrandimento)
- **WD = Working distance** (circa 10 mm)
- **HFW = Lunghezza dell'asse x**
- **detector SSD = detector per il back scattered** (solid state detector BSE)
- **picchi fuga elementi** come Ca
- stabilizzazione dello spettro dopo 50 sec
- analisi in cui si può parlare solo di rapporti relativi tra i picchi.

Su una serie rappresentativa di campioni di malta (campioni P1s, P6g, P9s, P10g, P16s) è stata determinata la composizione chimica relativa tramite analisi al SEM. Le immagini dei campioni e i grafici delle composizioni chimiche sono riportati tra gli allegati.

5. PROVE DEI TRATTAMENTI CONSERVATIVI

Le prove riguardano il trattamento di consolidamento e quello di protezione superficiale delle cortine murarie. Ciò al fine di ridurre i rischi conseguenti l'incremento repentino di peso dei paramenti indotto dagli eventi piovosi intensi e persistenti sempre più frequenti in questi territori, che possono determinare I.S.% anche totali con sovraccarichi non sempre ammissibili da parte degli apparecchi murari (si ricorda a tal proposito il crollo di un tratto della cinta muraria

rinascimentale di Urbino sottostante la Facoltà di Giurisprudenza). Considerate le esperienze pregresse condotte da chi scrive sui principali tipi di consolidanti e di idrorepellenti esistenti in commercio, in parte già pubblicate, e sulla base dell'ampia casistica dei risultati e sugli effetti conseguiti con questo tipo di trattamenti su opere architettoniche italiane, vengono qui considerati per il consolidamento gli “esteri etilici dell'anidride silicica” e per la protezione superficiale gli idrorepellenti a base di “silani”.

Per i laterizi sono state condotte in passato le seguenti esperienze utilizzando i provini di grosse dimensioni:

1) impregnazione superficiale per assorbimento capillare (10 min) con l'idrorepellente;

2) impregnazione per assorbimento capillare (2 h) con il consolidante, dopo 7 giorni, durante i quali i provini sono stati mantenuti all'aperto in condizioni riparate, applicazione per assorbimento capillare (10 min) dell'idrorepellente;

Per le arenarie del toro e a luoghi presenti nel tessuto murario sono state effettuate le seguenti esperienze:

1) impregnazione con consolidante per immersione totale (3 h); dopo 7 giorni durante i quali i provini sono stati mantenuti all'aperto in condizioni riparate, applicazione dell'idrorepellente (immersione per 10 min);

2) impregnazione con consolidante per immersione totale (3 h); dopo 7 giorni durante i quali i provini sono stati mantenuti all'aperto in condizioni riparate, applicazione dell'idrorepellente con funzione anche consolidante (immersione per 10 min);

Dopo ogni trattamento, il provino, allontanato l'eccesso superficiale, è stato pesato per determinare le quantità di prodotto penetrata; nei provini di mattone è stato inoltre possibile, dato il colore, misurare lo spessore impregnato del consolidante.

Terminate le esperienze, tutti i provini sono stati mantenuti all'aperto in condizioni riparate per 30 giorni, quindi l'efficacia dei trattamenti protettivi (ossia la riduzione delle quantità di acqua assorbite) è stata valutata ripetendo le esperienze di assorbimento capillare per i mattoni di assorbimento per immersione totale per i provini di arenaria.

6. MATERIALI

6.1. LATERIZI

Tenuti presenti anche i dati ricavati da una serie di pregresse esperienze di cottura a temperature variabili (da 600 °C a 1050 °C) su provini, le temperature dei due tipi di mattone (rossi e gialli) sono individuabili con sufficiente precisione: mattoni gialli fra 900 °C e 950 °C; mattoni rossi attorno agli 800 °C e in qualche caso nettamente inferiori, probabilmente poco sopra i 700 °C. Quest'ultima temperatura è confermata dal riscontro che si tratta di mattoni a bassa coerenza e fortemente degradati.

Per quanto concerne gli studi archeometrici eseguiti sulle cortine viene di seguito schematicamente riassunto quanto emerso.

Dimensioni laterizi omogenee e con poche differenze tra '500 e '700 (i valori sono espressi in cm):

Laterizio del '500: L=30,6; h=5,5; l=14,2; Giunti h=1,6; Giunti v=1,2
Laterizio del '700: L=31,4; h=4,7; l=15,2; Giunti h=1,1; Giunti v=0,9.

Colorazioni predominanti per i laterizi: giallo (10YR7/4-*Very pale brown*) e rosso (10R5/6 & 2.5YR5/6-*Red*); mura settecentesche con maggior numero di laterizi gialli.

Tessitura predominante del paramento: Gotica/Polacca.

Stato di conservazione mura: Scadente - si evidenzia una spinta decarbonatazione delle malte di connessione, con evoluzione del degrado aggravato dagli inquinanti emessi dal traffico veicolare e dagli spray marini, con perdita di coerenza della muratura, che si manifesta anche in set di fratture anche persistenti e secanti che favoriscono le infiltrazioni delle acque meteoriche; sia sulle discontinuità sia sui prodotti di alterazione si impostano piante infestanti, erbacee e arbustive, raramente arboree.

6.2. MALTE

Le analisi calcimetriche e la microanalisi al SEM evidenziano un elevato tenore di Ca^{++} nelle malte sia cinquecentesche sia settecentesche, cui si associano minori tenori di quarzo e altri minerali silicatici. Sarà necessario, nel prosieguo dello studio, condurre anche analisi diffrattometriche.

Dalle indagini al SEM si evince la presenza di minerali e sali di neoformazione contenenti zolfo, bario e alite, come riportato anche nella documentazione fotografica allegata in calce al presente lavoro. La presenza di composti dello zolfo è probabilmente riconducibile a processi di solfatazione operati dalle "piogge acide" a spese del legante carbonatico degli agglomerati in esame: tali acque, solfatiche, circolano verosimilmente per capillarità; la presenza di alite è riconducibile all'esposizione del sito agli *spray* marini.

Le malte costituenti il legante delle murature sono riferibili a impasti di calce idrata fortemente impura e aggregati perlopiù carbonatici e/o, in subordine, silico-carbonatici, fabbricate cuocendo a temperature non uniformi di circa 600-650 °C frantumato di rocce calcareo-marnose di origine locale. Esse sono ben note nell'architettura "povera" del territorio e si rinvengono sia negli edifici di particolare pregio storico-architettonico sia nei fabbricati rurali e possono essere definite "bastarde" in quanto mal depurate della frazione non carbonatica e/o contenenti una certa quantità di ossido di calcio non idratato (grumi di legante), che danno luogo alle note modeste caratteristiche fisico-meccaniche rilevate (la totalità dei campioni prelevati/osservati nelle murature si "disfano" facilmente con la semplice pressione delle dita) e al tipico aspetto terroso. Più precisamente il legante si presenta da mediamente a molto torbido; caratteristica di questo tipo di malta è la costante presenza di "grumi" di legante puro di dimensioni variabili e talora numerosissimi.

L'inerte è parte carbonatico, parte silicatico con granulometria relativamente dispersa con dimensioni dei granuli da silt a sabbia medio-fine, con una "coda" sensibilmente più grossolana in quantità variabile da campione a campione. Fanno parte dell'inerte anche alcuni frammenti, relativamente grossolani, di rocce clastiche a grana siltosa.

Si può parlare di una corretta proporzione fra inerte e legante, ossia in rapporto 2:1, e con un'appropriata distribuzione granulometrica di quest'ultimo.

Si è potuto osservare, inoltre, che sono presenti anche malte cementizie applicate nel corso di interventi di restauro più o meno recenti mal eseguiti, e ormai quasi completamente distaccate.

7. PROCESSI DI DEGRADAZIONE E STATI DI CONSERVAZIONE DELLE CORTINE LATERIZIE

Alla luce dei dati analitici raccolti e delle puntali osservazioni *in situ* condotte a più riprese, è possibile delineare un quadro sufficientemente preciso dello stato di conservazione sia dei singoli materiali che delle cortine laterizie nel loro insieme.
È evidente che, nell'ambito di una relazione tecnica, non è possibile esporre tutta la mole di osservazioni e tutte le particolari situazioni riscontrate nelle varie parti durante i numerosi sopraluoghi, né dilungarsi eccessivamente nella descrizione e nell'interpretazione dei processi di degrado. Ci si limiterà quindi a illustrare le principali fenomenologie individuate e le situazioni più rappresentative e che richiedono una particolare attenzione.
I principali processi di degrado che interessano i **laterizi** sono fondamentalmente di carattere fisico e si traducono nella progressiva formazione e caduta di croste o squame dalla superficie a vista, oltre a fenomeni di disgregazione. Tali processi sono strettamente legati alle caratteristiche intrinseche del manufatto. Concorrono alla formazione di tali croste gli strati superficiali più compatti sia presenti in origine nel manufatto che formatisi per riprecipitazione superficiale del carbonato di calcio e la quasi inesistente manutenzione dell’Opera. Poiché tali fenomeni sono determinati essenzialmente dagli sbalzi termici e dai gradienti di temperatura che si creano fra lo strato esterno e la parte interna, i loro effetti raggiungono le massime intensità proprio nel tratto esposto a sud. Una volta createsi delle discontinuità, i meccanismi in questione sono probabilmente incrementati dal fenomeno di gelo e disgelo.
Non sono da trascurare gli effetti dell'aggressione biologica operata dagli organismi vegetali infestanti che prosperano in vaste zone della cortina laterizia.
Nel complesso lo stato medio di conservazione dei laterizi è scadente in quanto una percentuale consistente non appare fisicamente integra.
Per quanto riguarda le **malte**, eccezion fatta per le malte strutturali (interne alla struttura a “sacco”), queste appaiono nella massima parte dei casi praticamente assenti o in uno stato di degrado tale da risultare del tutto inefficienti. Non devono trarre in inganno alcuni punti nei quali le malte sembrano ancora presenti in buone condizioni; è stato verificato che in realtà è presente

un sottile strato esterno di malta, di spessore attorno al centimetro, parzialmente indurito da fenomeni di riprecipitazione secondaria di carbonato di calcio, mentre più internamente si incontra il vuoto per il completo collasso della malta stessa, ridotta a un residuo sabbioso. La degradazione delle malte è legata a diversi meccanismi: fenomeni di decoesione principalmente fra granuli dell'inerte e legante e di conseguente disgregazione; dissoluzione del legante da parte delle acque d'imbibizione con progressivo aumento della porosità e contemporanea solfatazione dello stesso operata dalla reazione fra lo ione $(SO_4)^{2-}$ presente nelle "acque acide" e il carbonato di calcio con formazione del gesso. In alcuni casi quest'ultimo processo assume un'importanza notevolissima creando situazioni nelle quali parte del legante è stata trasformata in gesso. La distruzione delle malte è anche causata dai vegetali superiori (erbe e cespugli) che infestano i tratti murari in esame. Le condizioni delle cortine laterizie, nelle quali si distinguono numerosi rifacimenti, oltre ad una vera e propria massiccia edificazione nella parte sommitale, oltre il cordolo in pietra (toro), sono estremamente precarie. La causa principale risiede nella profonda degradazione e nel collasso delle malte, considerato anche che tutte le integrazioni con le malte cementizie si sono rivelate inefficaci, se non dannose. In conseguenza di ciò in alcune porzioni delle cortine, specie al piede di queste ultime, si sono create lacune, alcune di discreta ampiezza, in continuo e progressivo ampliamento per la caduta di singoli mattoni e la carenza di manutenzione.

8. TRATTAMENTI CONSERVATIVI

Tralasciando per semplicità di riportare i dati analitici, le prove effettuate in passato su provini e con i prodotti descritti in precedenza hanno dato i seguenti risultati. È da premettere che, per quanto concerne i trattamenti di consolidamento, avendo utilizzato provini sostanzialmente integri, le prove avevano il solo scopo di valutare i livelli di impregnazione ottenibili e l'idoneità del prodotto con i materiali in questione. Il buon effetto consolidante di tale prodotto è garantito dalle numerose esperienze effettuate in passato anche su materiali particolarmente "difficili" come le arenarie.

8.1. LATERIZI

I risultati conseguiti da precedenti esperienze hanno dimostrato che l'efficacia dell'idrorepellente è notevolmente incrementata dalla preventiva impregnazione con il consolidante. Infatti con la sola applicazione dell'idrorepellente si è registrata una diminuzione della capacità di assorbimento

capillare d'acqua (efficacia del trattamento) mediamente dell'81%. Nel secondo caso la riduzione media dell'assorbimento è salita fino al 92%. Considerati questi risultati, si ritiene quanto mai opportuno estendere il consolidamento, utilizzando quantità opportune di prodotto,anche ai laterizi in buono stato di conservazione che a stretto rigore non necessiterebbero di questo tipo di trattamento. Si consideri, inoltre, che sul piano pratico sarebbe ben difficilmente proponibile un trattamento differenziato che implicherebbe la scelta preliminare dei singoli mattoni da consolidare e non.

8.2 ELEMENTI IN PIETRA

Le serie di provini, precedentemente trattate con il consolidante hanno indicato che, sotto il profilo del trattamento conservativo, i migliori risultati sono ottenibili con I'impiego anche dell'idrorepellente.

8.3 INDAGINI SUL LEGANTE PER LE NUOVE MALTE

Escluso, per motivi che sarebbe ormai prolisso elencare, l'impiego di qualsiasi tipo di cemento, considerata I'estrema difficoltà di reperire un grassello di calce preparato con i sistemi tradizionali e ritenendo di non poter proporre I'impiego di calci aeree di tipo industriale ("calce idrata in polvere") suscettibili di dar luogo a inconvenienti gravi quanto imprevedibili, ci si è orientati verso una calce moderatamente idraulica. Tra quelle in commercio è stata presa in considerazione la "CALCE BIANCA LAFARGE" che, data la natura della materia prima, offre le migliori garanzie di idoneità e di purezza chimica. Sono stati acquisiti tutti i dati tecnici concernenti questo prodotto sul quale successivamente sono stati effettuati gli opportuni controlli di laboratorio. I principali dati tecnici sono i seguenti:

- indice di idraulicità: 0,18
- inizio della presa: 2h 30m - 4h
- fine della presa: 5h 20m - 6h 20m
- composizione chimica:
    - ✓ SiO_2 = 11,10 %
    - ✓ Al_2O_3 = 0,65 %

- ✓ CaO = 65,72 %
- ✓ MgO = 0,43 %
- ✓ Fe_2O_3 = 0,12 %
- ✓ CO_2 = 11,25 %
- ✓ SO_3 = 0,65 %
- ✓ K_2O = 0,17 % *in forma solubile*
- ✓ Na_2O = 0,05 % *in forma solubile*
- ✓ H_2O = 9,86 %.

Da tale composizione chimica è possibile calcolare i componenti della calce, sapendo che il composto idraulico presente è il C_2S (C_2SiO_4).

Si ottiene la seguente composizione:

- ✓ $Ca(OH)_2$ = 40,58 %
- ✓ C_2S = 31,82 %
- ✓ $CaCO_3$ = 25,58 %.

I controlli di laboratorio eseguiti in precedenza sono consistiti nell'analisi diffrattometrica, nel dosaggio del $CaCO_3$ per via calcimetrica e nella determinazione dell'$(SO_4)^{2-}$ e dei metalli alcalini eventualmente presenti in forma solubile. Dall'analisi calcimetrica il tenore di $CaCO_3$ è risultato del 26,2 %.

Dall'analisi diffrattometrica gli altri due componenti sono risultati presenti circa nelle stesse quantità ricavate dal calcolo; è stata riscontrata inoltre una piccola quantità di silice non combinata sottoforma di quarzo (1 - 2 %). L'analisi chimica della frazione solubile in acqua ha dato i seguenti risultati:

- ✓ $(SO_4)^{2-}$ = 0,44 %
- ✓ K_2O = 0,15 %
- ✓ Na_2O = 0,08 %

in ottimo accordo con i dati forniti dal produttore. Dato l'esito positivo di questi controlli si ritiene che tale calce offra tutte le necessarie garanzie per essere impiegata nella preparazione delle malte che saranno necessarie al restauro delle Mura.

8.4 INTERVENTI CONSERVATIVI

L'esecuzione di questi interventi richiede tassativamente la preventiva eliminazione delle acque di qualsiasi natura che interessino le strutture murarie. Dovranno pertanto essere bonificati, con opportune opere, i terreni di fondazione delle Mura, dove si verificano massicce risalite per capillarità. Inoltre gli interventi in questione, che concludono il restauro, devono essere preceduti da tutti quelli di carattere strutturale ricordando che la città di Senigallia presenta un'elevata sismicità.

Dai dati raccolti con le presenti indagini e dalle considerazioni esposte in precedenza si propongono i seguenti interventi conservativi che vengono descritti, salvo casi particolari, secondo l'ordine di esecuzione.

8.4.1. DISINFESTAZIONE, PULITURA E LAVAGGIO

La disinfestazione dai vegetali riguarda l'intero sistema murario, Dal momento che sono presenti diverse piante arboree, erbacee e colonie licheniche. L'eliminazione delle piante superiori può avvenire per via meccanica, con tutte le cautele necessarie per non arrecare danni alla muratura e avendo cura di rendere inoffensive le parti degli apparati radicali che dovessero rimanere in posto. I licheni possono essere distrutti mediante impacchi di acqua ossigenata a 120 vol.; ove possibile l'operazione può essere facilitata asportando in precedenza con spatole di legno la maggior parte dell' “incrostazione" lichenica.

L'operazione di pulitura potrà coincidere in linea di massima con il lavaggio, quest'ultimo inteso come l'allontanamento di tutti i materiali o sostanze che possono ostacolare i trattamenti di consolidamento e di protezione superficiale: porzioni irrecuperabili, materiale pulverulento superficiale, residui delle sostanze usate per la pulitura e, in primissimo luogo, i sali solubili. Prima dell'operazione dovranno essere allontanate per via meccanica, con la dovuta cautela, tutte le parti e i materiali irrecuperabili o dannosi:

- ✓ malte degradate

- ✓ residui delle integrazioni in malte cementizie e alcuni mattoni
- ✓ croste e frammenti non ricollegabili degli elementi in arenaria

per alcuni di questi è da prospettare l'ipotesi della sostituzione, ovviamente subordinata all'approvazione della Soprintendenza ai BB. AA. AA. delle Marche. In caso affermativo, in questa fase dovrà essere operata la loro rimozione, mentre il collocamento in opera dei nuovi elementi avverrà dopo il trattamento di consolidamento. L'operazione di pulitura – lavaggio potrà essere effettuata in generale con acqua deionizzata, o quanto meno a bassissima durezza. Nei tratti meglio conservati l’acqua potrà essere irrorata con una certa pressione, per completare l'allontanamento dai giunti dei residui delle malte degradate e del materiale di infiltrazione, ripetendo l’operazione più volte e operando su settori di superficie unitaria. Sui mattoni si potrà ricorrere all'ausilio di spazzole vegetali o in fibra plastica. Ove le condizioni della pietre lo consentono, oltre all'uso di spazzole del tipo indicato, sarebbe opportuno una prima pulitura con un tensioattivo neutro per allontanare i prodotti “oleosi” dell'inquinamento atmosferico che, pur non visibili, formano spesso un film superficiale, pressoché impermeabile. In alcune parti, peraltro limitatissime, sarà forse necessario ricorrere agli "impacchi adsorbenti" (attapulgite + soluzione di carbonato d'ammonio) o alla microsabbiatura. A questo proposito si vedano le raccomandazioni conclusive. Terminate queste operazioni con ripetuti lavaggi con acqua deionizzata, si dovrà attendere un congruo periodo di tempo per il necessario essiccamento di tutti i materiali.

8.4.2. CONSOLIDAMENTO

Per le ragioni precedentemente esposte si ritiene opportuno trattare con il consolidante tutti i mattoni delle cortine utilizzando il prodotto consolidante.

Per gli elementi in pietra le applicazioni dovranno essere realizzate a spruzzo, ripetendo "bagnato su bagnato" fino a rifiuto da parte del materiale. ove ritenuto necessario, una seconda applicazione potrà essere eseguita a distanza di 3-4 giorni. Eventuali eccessi del prodotto dovranno essere immediatamente eliminati con panno assorbente leggermente imbevuto di alcool etilico,onde evitare la formazione di pellicole lucide superficiali. Le quantità da prevedere sono:

- ✓ da 4 a 8-9 kg/m^2 per i laterizi
- ✓ da 4 a 6-7 kg/m^2 per le arenarie.

Il consolidamento riguarderà anche, ovviamente, le malte antiche e i residui di esse, suscettibili di essere conservati. Pertanto il prodotto dovrà essere irrorato anche nei giunti aperti delle cortine laterizie per consolidare le malte interne e impregnare maggiormente i singoli laterizi.

8.4.3. PROTEZIONE SUPERFICIALE

Ritenendo possibile che I'applicazione dell'idrorepellente possa pregiudicare un corretto processo di indurimento delle nuove malte (considerato il tipo di legante prospettato), è opportuno che il trattamento protettivo venga effettuato immediatamente dopo il consolidamento, precedendo l'applicazione di tali malte (nei giunti, lesioni, fessure, per integrazioni e rifacimenti). Fanno eccezione le fratture e le fessure più sottili che dovranno essere sigillate con resina epossidica convenientemente fluida prima del trattamento.

In queste condizioni, durante I'applicazione dell'idrorepellente dovranno essere protette in modo opportuno le superfici che verranno a contatto con le malte o con parti e frammenti da ricollegare. Ad esempio, i giunti aperti, in particolare quelli delle cortine laterizie, potranno essere momentaneamente riempiti con materiale che vi impedisca la penetrazione dell'idrorepellente (anche con semplice carta assorbente).

Poiché, come è ben noto, l'efficacia dei trattamenti protettivi è limitata nel tempo e pertanto questi devono essere considerati e previsti come una forma di manutenzione periodica, l'applicazione dell'idrorepellente sulle malte di nuova realizzazione potrà avvenire in occasione della prima ripetizione dei trattamenti. Tale scadenza può essere prevista indicativamente a distanza di 6-10 anni a seconda dei vari tipi di materiale lapideo. La necessità dei nuovi trattamenti andrebbe valutata sulla base dei controlli in situ (prove di assorbimento superficiale) da effettuarsi ogni 3 anni circa. Sulla base delle prove di laboratorio, sono da prevedere le seguenti applicazioni da iniziare 8-10 giorni dopo il trattamento di consolidamento:

1. laterizi: applicazione a spruzzo dell’idrorepellente in quantità variabili da 300 a 400 gr/m^2;

2. elementi in arenaria: applicazione a spruzzo dell'idrorepellente in quantità variabili da 300 a 500 gr/m^2 secondo lo stato di degrado.

Per non pregiudicare il processo di essiccamento del consolidante e degli idrorepellenti, è necessario che durante i trattamenti e per almeno 10 giorni successivi tutte le superfici interessate siano accuratamente riparate dalla pioggia e dalla diretta insolazione. Inoltre, i trattamenti devono

essere eseguiti in un momento stagionale nel quale la temperatura ambiente sia compresa fra 5 e 25°C.

8.4.4. APPLICAZIONE NUOVE MALTE, INTEGRAZIONI, SIGILLATURA DI FESSURE, SOSTITUZIONI, RICOLLEGAMENTI

Per le **malte** si propone la seguente composizione:

- ✓ LEGANTE: CALCE BIANCA LAFARGE - Tenute presenti le condizioni abbastanza aggressive esistenti ("piogge acide", possibili acque con un certo carico salino) si suggerisce l'aggiunta di pozzolana, in quantità di circa il 15 % in peso (85 Kg di calce + 15 Kg di pozzolana), raccomandando la massima cura per una perfetta omogeneizzazione dei due componenti prima dell'impasto.
- ✓ INERTE - Considerando le difficoltà di reperire o preparare un inerte analogo a quello delle malte antiche a composizione carbonatico-silicatica, si potrà impiegare un inerte di composizione essenzialmente silicatica realizzando una malta analoga a quella originaria. L'inerte, oltre ai normali requisiti (assenza di sali solubili, di sostanze organiche e ben depurato), sarà costituito da una sabbia silicatica con una regolare distribuzione granulometrica nell'intervallo 0,1-1,5 mm.

Il rapporto ottimale fra inerte e legante è da ritenersi attorno a 2,5 (in volume), ossia circa 0,7 m^3 di inerte per 0,3 m^3 di legante. È evidente che tali proporzioni sono valide a condizione che l'inerte presenti la corretta distribuzione granulometrica.

Lo stesso tipo di malta potrà essere impiegata per le integrazioni e il riempimento di vuoti e fessure, con l'eventuale aggiunta di opportuni pigmenti minerali (ed eventualmente variando il tipo di inerte). Ove siano necessarie malte più fluide si potrà, entro certi limiti, diminuire il rapporto inerte/legante e la granulometria dell'inerte. Quando non sia possibile l'uso di queste malte, ad esempio per le fessure più sottili, si potrà ricorrere a resine epossidiche iniettate a pressione, eventualmente caricate con un inerte siliceo fine; queste ultime dovrebbero essere protette da uno strato superficiale di malta del tipo indicato in precedenza.

Per quanto concerne infine i **laterizi**, tenuti presenti i risultati delle specifiche indagini, si propone l'impiego di quelli tradizionali realizzati con materia prima locale che, oltre alle caratteristiche

composizionali e fisiche idonee, si presentano sotto gli aspetti tessiturale ed estetico perfettamente in accordo con i mattoni antichi in opera.

9. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE E RACCOMANDAZIONI

La riuscita degli interventi conservativi, in particolare l'efficacia dei trattamenti di consolidamento e di protezione superficiale, è subordinata da una loro attenta e scrupolosa esecuzione.

Considerate anche le situazioni particolarmente delicate, si ritiene che per l'esecuzione di tali trattamenti, sin dalla pulitura, sia necessaria la collaborazione e la supervisione di un restauratore particolarmente qualificato nel campo della conservazione dei materiali lapidei.

ALLEGATI

1. DOCUMENTAZIONE FOTOGRAFICA DELLE STAZIONI DI CAMPIONAMENTO

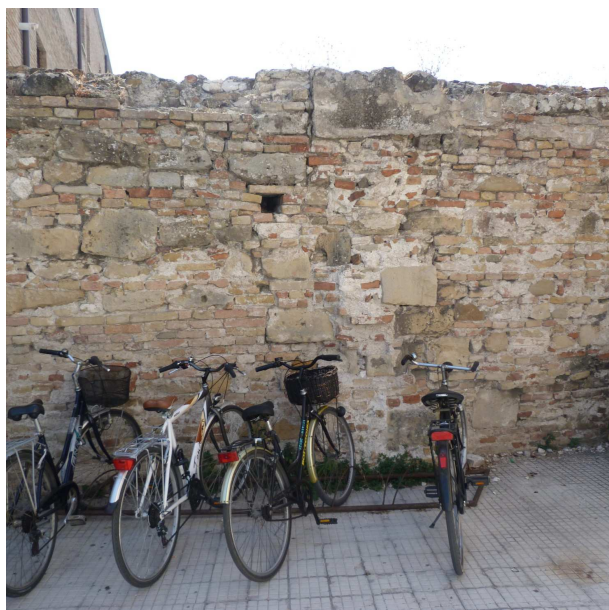



Fig.1 Stazione P1 (Baluardo della Penna - Scuola G. Pascoli) ***Il tratto di Mura investigato si estende per una lunghezza di 6,17 m: l'area studio delimitata dalle bandierine, e sede del campionamento, è posta a 1,95 m dal margine sinistro del muro e a 91 cm circa dal suolo.***

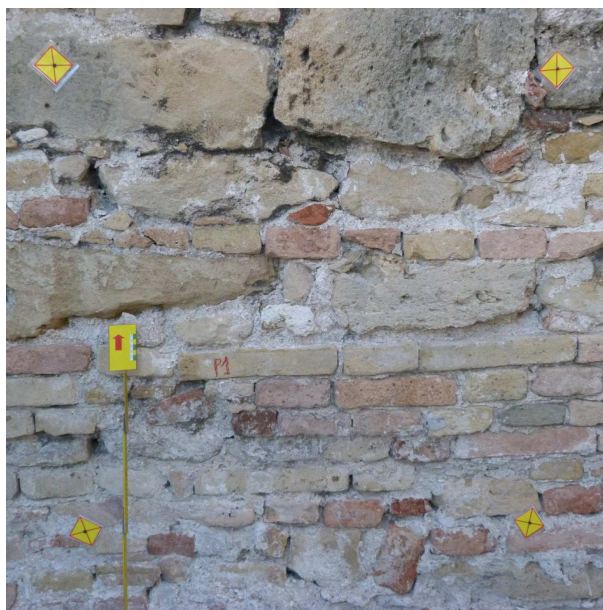



Fig.2 Stazione di campionamento 1m x 1m individuata attraverso 4 bandierine (cerchiate in rosso); la freccia rossa indica il punto del prelievo; è presente una scheda gialla che funge da riferimento centimetrico (rettangoli gialli e verdi alternati, ognuno da 1 cm).

Fig.3 Campione di malta P1 con riferimento centimetrico a sinistra.

***Fig.4** Il tratto di Mura investigato si estende per una lunghezza di 28 m: l'area studio delimitata dalle bandierine, e sede del campionamento, è posta a 1,10-1,20 m dal margine destro del muro (baluardo della Penna) e a 100 cm circa dal suolo. Campioni migliori di malta potrebbero essere prelevati ad un'altezza di 2,50-3,00 m dal suolo.*

***Fig.5** Stazione di campionamento 1m x 1m individuata attraverso 4 bandierine); la freccia rossa indica il punto del prelievo; è presente una scheda gialla che funge da riferimento centimetrico (rettangoli gialli e verdi alternati, ognuno da 1 cm).*

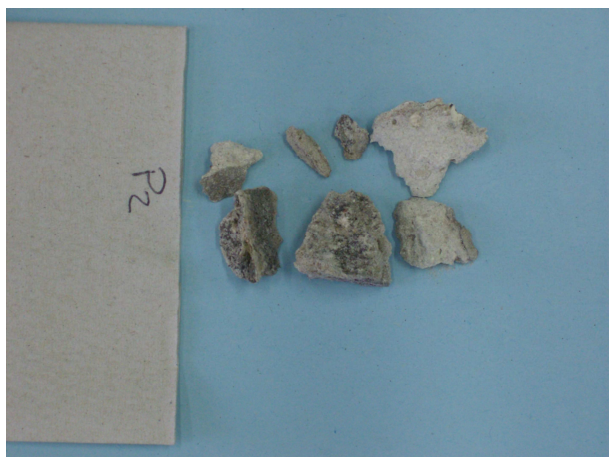



***Fig.6** Campione di malta P2.*

Fig.7 Il tratto di Mura investigato si estende per una lunghezza di 47 m: l'area studio delimitata dalle bandierine, e sede del campionamento, è posta a 22,7 m dal Comune e a 100 cm circa dal suolo.

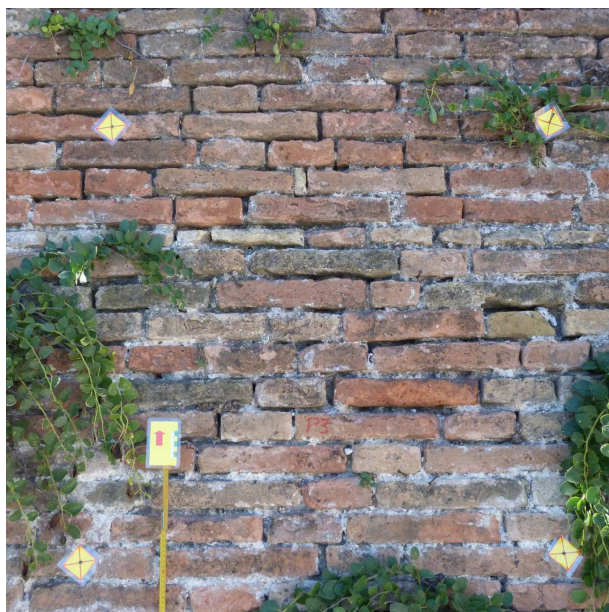



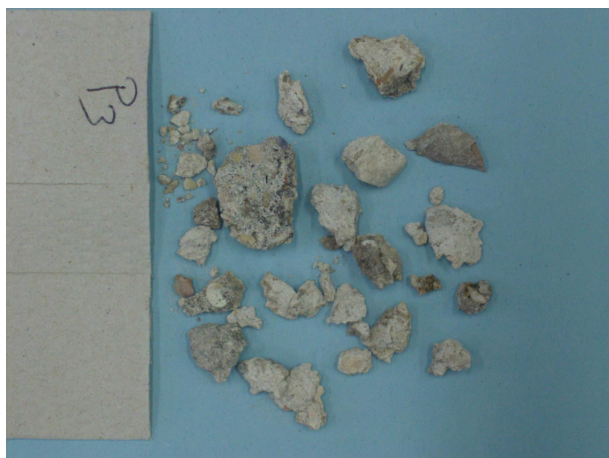
Fig. 8 Stazione di campionamento 1m x 1m individuata attraverso 4 bandierine; la freccia rossa indica il punto del prelievo; è presente una scheda gialla che funge da riferimento centimetrico (rettangoli gialli e verdi alternati, ognuno da 1 cm).

Figg.9, 10, 11 Campioni eterometrici di malta P3.

Fig.12 L'area studio delimitata dalle bandierine, e sede del campionamento, è posta a 7,90 m dal Comune e a 100 cm circa dal suolo.

Fig.13 Stazione di campionamento 1m x 1m individuata attraverso 4 bandierine; la freccia rossa indica il punto del prelievo; è presente una scheda gialla che funge da riferimento centimetrino (rettangoli gialli e verdi alternati, ognuno da 1 cm).

Fig.14 Campione di malta P4 con riferimento centimetrico a sinistra.

Fig.15 Il tratto di Mura investigato si estende per una lunghezza di 63,55 m : l'area studio delimitata dalle bandierine, e sede del campionamento, è posta a 9,25 m dal margine sinistro del muro e a 53,30 m circa dal cancello che delimita il tratto di Mura dietro al comune.

Fig.16 Stazione di campionamento 1m x 1m individuata attraverso 4 bandierine è presente una scheda gialla che funge da riferimento centimetrico (rettangoli gialli e verdi alternati, ognuno da 1 cm).

Figg. 17, 18 Campioni di malta P5/1 & P5/2 con riferimento centimetrico a sinistra.

Fig.19 Il tratto di Mura investigato si estende per una lunghezza di 108,10 m: l'area studio delimitata dalle bandierine, e sede del campionamento, è posta a 67,90 m dal margine sinistro del muro e a 100 cm circa dal suolo.

Fig.20 Stazione di campionamento 1m x 1m individuata attraverso 4 bandierine; la freccia rossa indica il punto del prelievo; è presente una scheda gialla che funge da riferimento centimetrico (rettangoli gialli e verdi alternati, ognuno da 1 cm).

Fig.21 Campione di malta P6 con riferimento centimetrico a sinistra.

Fig.22 Il tratto di Mura nei pressi dell'ingresso di servizio del Teatro "La Fenice".

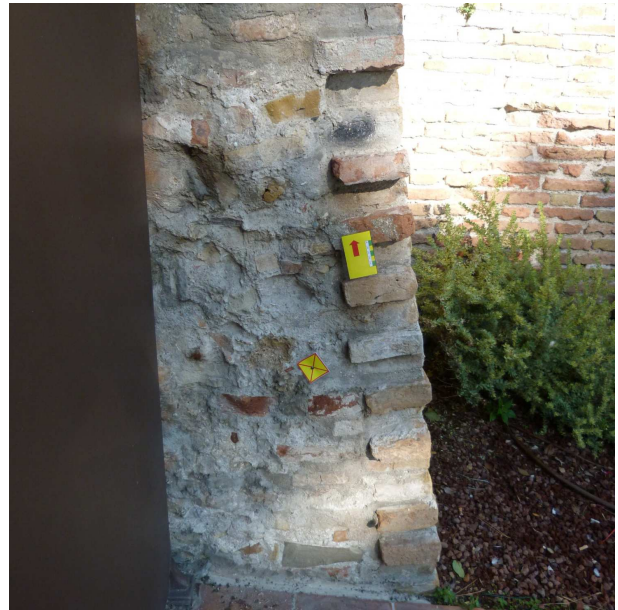



Fig.23 Particolare della stazione di campionamento.

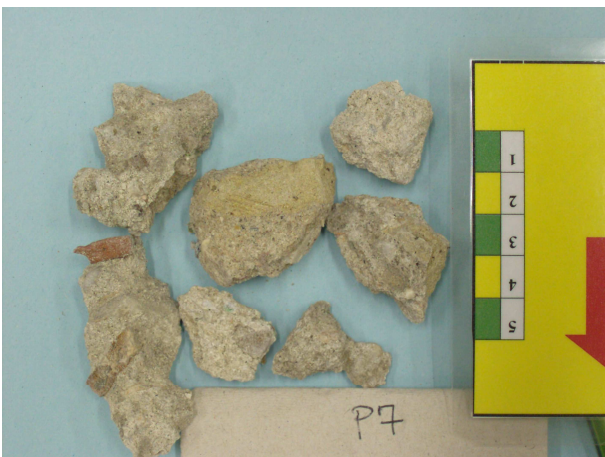



Fig.24 Campione di malta P7 con riferimento centimetrico a sinistra.

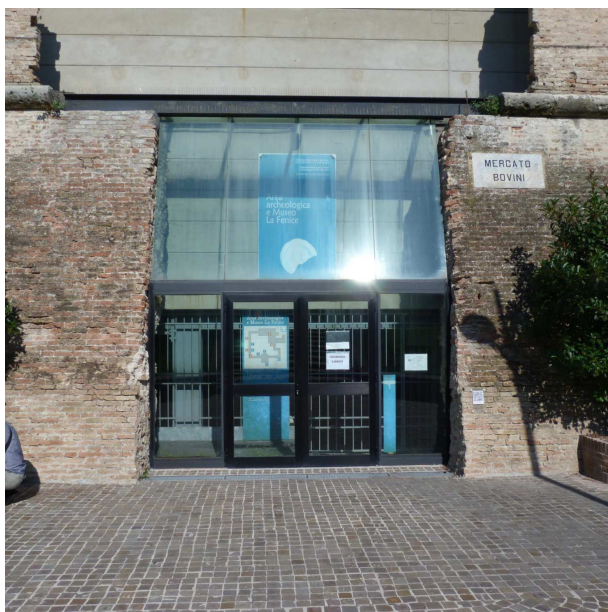



Fig.25 Il tratto di Mura in corrispondenza dell'ingresso del Museo archeologico.

Fig.26 Zona del campionamento.

Fig.27 Campione di malta P8 con riferimento centimetrico a sinistra.

Fig.28 Il tratto di Mura all'imbocco di Via Pisacane.

Fig.29 Zona del campionamento.

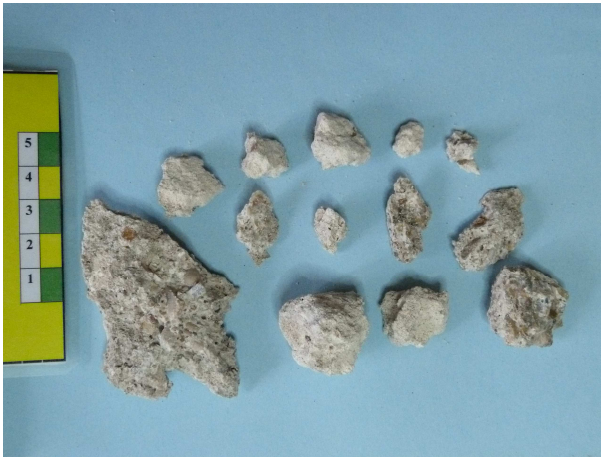



Fig.30 Campione di malta P9 con riferimento centimetrico a sinistra.

Fig.31 Il tratto di Mura investigato si estende per una lunghezza di 28,9 m: l'area studio delimitata dalle bandierine, e sede del campionamento, è posta a 19,7 m dal margine destro del muro e a 100 cm circa dal suolo.

Fig.32 Stazione di campionamento 1m x 1m individuata attraverso 4 bandierine); la freccia rossa indica il punto del prelievo; è presente una scheda gialla che funge da riferimento centimetrino (rettangoli gialli e verdi alternati, ognuno da 1 cm).

Fig.33 Campione di malta P10 con scala di riferimento a sinistra.

Fig.34 Il tratto di Mura investigato si estende per una lunghezza di 28,9 m: l'area studio delimitata dalle bandierine, e sede del campionamento, è posta a 3,5 m dal margine sinistro del muro e a 100 cm circa dal suolo.

Fig.35 Stazione di campionamento 1m x 1m individuata attraverso 4 bandierine; la freccia rossa indica il punto del prelievo; è presente una scheda gialla che funge da riferimento centimetrino (rettangoli gialli e verdi alternati, ognuno da 1 cm).

Fig.36 Campione di malta P11/1 con scala di riferimento a sinistra.

Fig. 37 Campione di malta P11/2 con scala di riferimento a sinistra.

Fig.38 Il tratto di Mura investigato si estende per una lunghezza di 53,4 m: l'area studio delimitata dalle bandierine, e sede del campionamento, è posta a 28 m dal margine sinistro del muro e a 100 cm circa dal suolo.

Fig.40 Campione di malta P12 con scala di riferimento a sinistra.

Fig.39 Stazione di campionamento 1m x 1m individuata attraverso 4 bandierine; la freccia rossa indica il punto del prelievo; è presente una scheda gialla che funge da riferimento centimetrico (rettangoli gialli e verdi alternati, ognuno da 1 cm).

Fig.41 Le Mura inglobate nella struttura di Porta Lambertina.

Fig.42 Zona del campionamento.

Fig.43 Campione di malta P13 con scala di riferimento a sinistra.

Fig.44 Il tratto di Mura investigato si estende per una lunghezza di 91 m: l'area studio delimitata dalle bandierine, e sede del campionamento, è posta a 60 m dal margine sinistro del muro e a 100 cm circa dal suolo.

Fig.45 Stazione di campionamento 1m x 1m individuata attraverso 4 bandierine; la freccia rossa indica il punto del prelievo; è presente una scheda gialla che funge da riferimento centimetrico (rettangoli gialli e verdi alternati, ognuno da 1 cm).

Fig.46 Campione di malta P14 con scala di riferimento a sinistra.

Fig.47 Il tratto di Mura investigato si estende per una lunghezza di 32,7 m: l'area studio delimitata dalle bandierine, e sede del campionamento, è posta a 28,1 m dal margine sinistro del muro e a 100 cm circa dal suolo.

Fig.48 Stazione di campionamento 1m x 1m individuata attraverso 4 bandierine; la freccia rossa indica il punto del prelievo; è presente una scheda gialla che funge da riferimento centimetrico (rettangoli gialli e verdi alternati, ognuno da 1 cm.

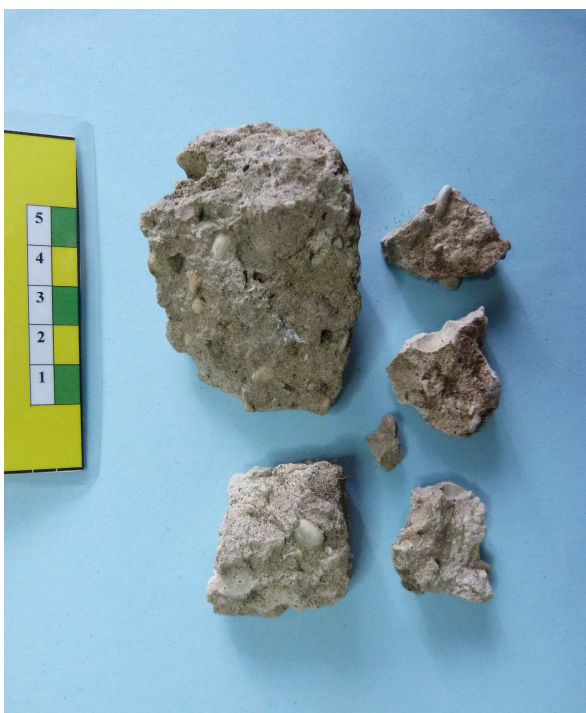



Fig.49 Campione di malta P15 con scala di riferimento a sinistra.

Fig.50 Il tratto di Mura investigato è posto ad una distanza di circa 13,6 m dalla Rocca Roveresca.

Fig.51 Zona del campionamento.

Fig.52 Campione di malta P16 con scala di riferimento a sinistra.

2. CAMPITURE

Fig. 53 Stazione di campionamento P1.

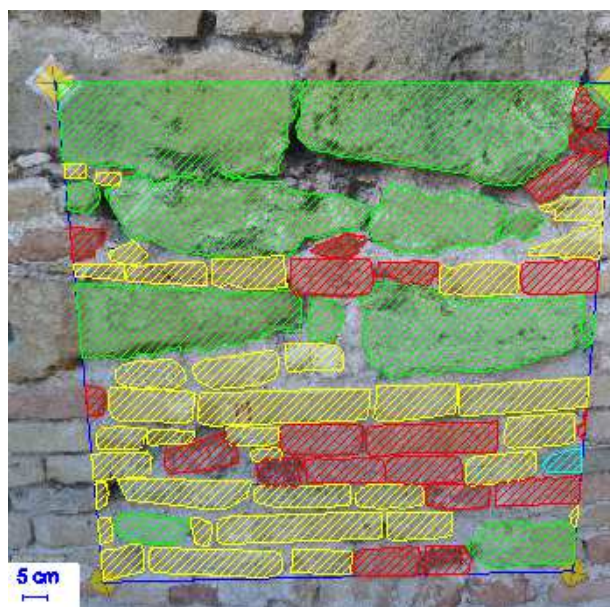



Fig. 54 Fotogramma della campitura per la stazione P1 sovrapposto alla muratura: in verde, giallo, rosso e azzurro rispettivamente il materiale lapideo, mattoni gialli, rossi e grigi.

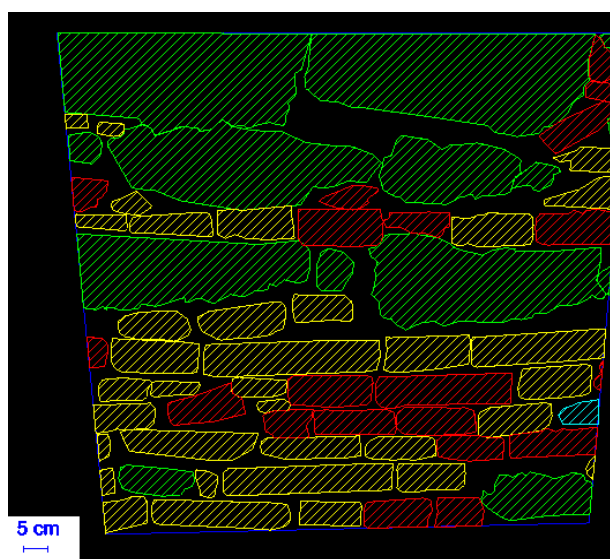



Fig. 55 Fotogramma della campitura per la stazione P1: in verde, giallo, rosso e azzurro rispettivamente il materiale lapideo, mattoni gialli, rossi e grigi.

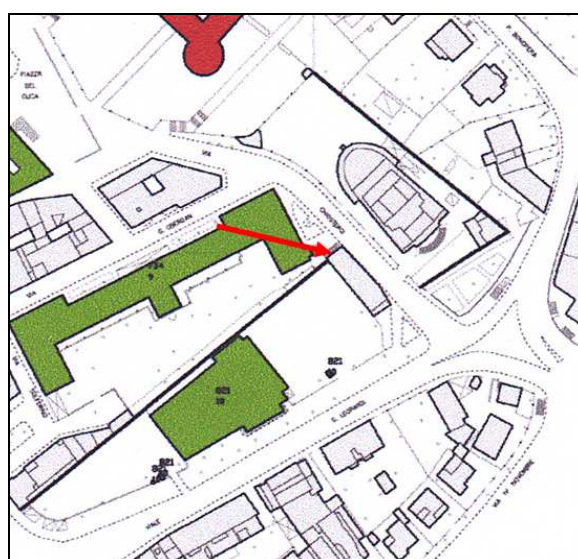



***Fig. 56 Ubicazione della stazione* di campionamento P1.**

Fig. 57 Stazione di campionamento P2.

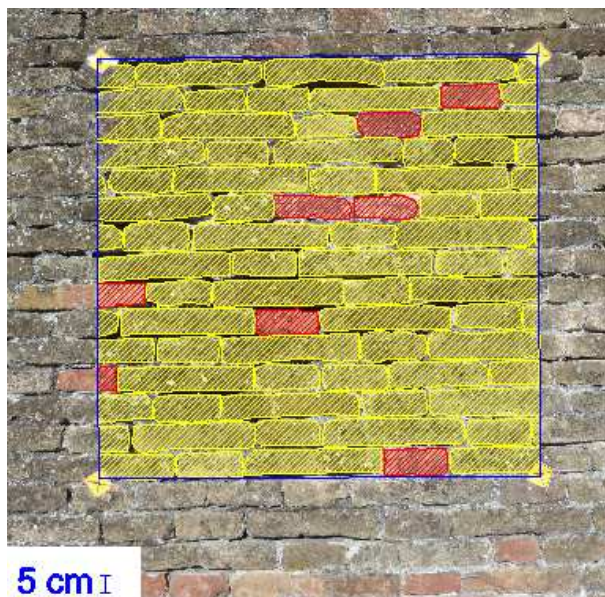



Fig. 58 Fotogramma della campitura per la stazione P2 sovrapposto alla muratura: in giallo e rosso rispettivamente mattoni gialli e rossi.

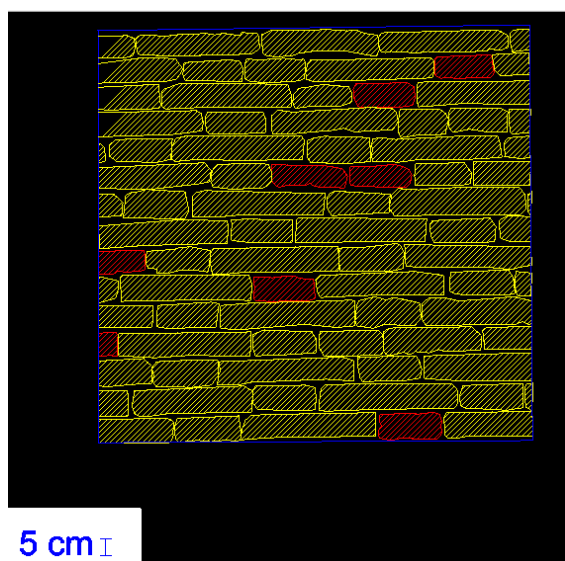



Fig. 59 Fotogramma della campitura per la stazione P2: in verde, giallo, rosso e azzurro rispettivamente il materiale lapideo, mattoni gialli, rossi e grigi.

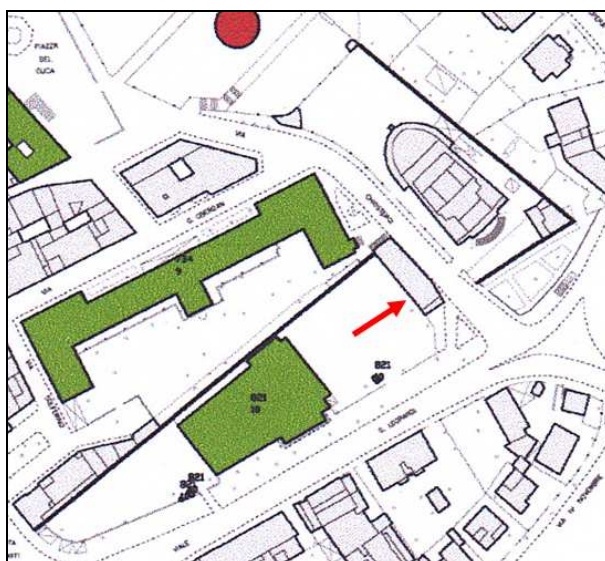



Fig. 60 Ubicazione della stazione di campionamento P2.

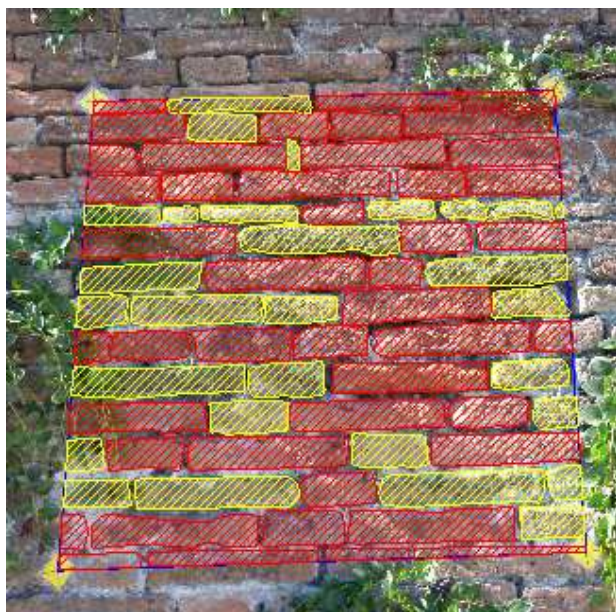



Fig. 61 Fotogramma della campitura per la stazione P3 sovrapposto alla muratura: in giallo e rosso rispettivamente mattoni gialli e rossi.

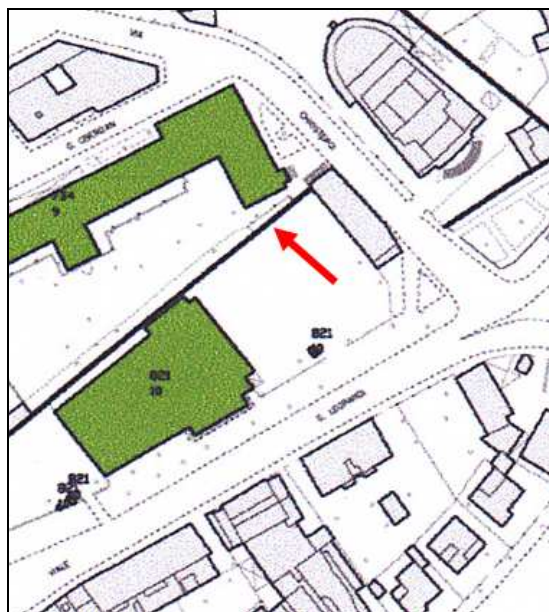



Fig. 62 Ubicazione della stazione di campionamento P3.

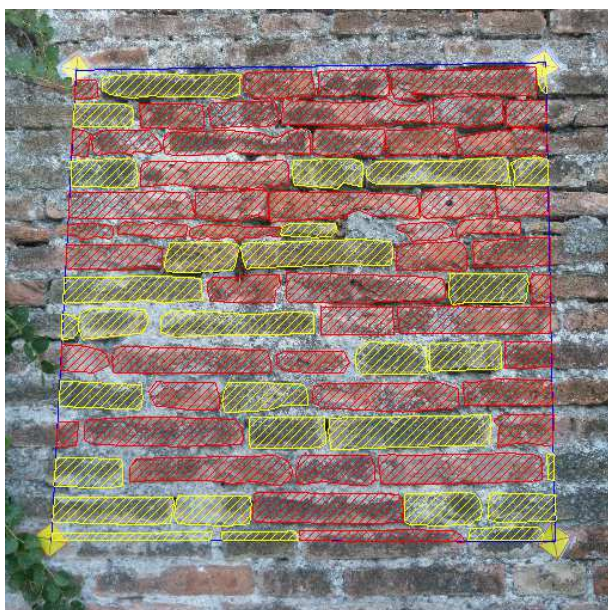



Fig. 63 Fotogramma della campitura per la stazione P4 sovrapposto alla muratura: in giallo e rosso rispettivamente mattoni gialli e rossi.

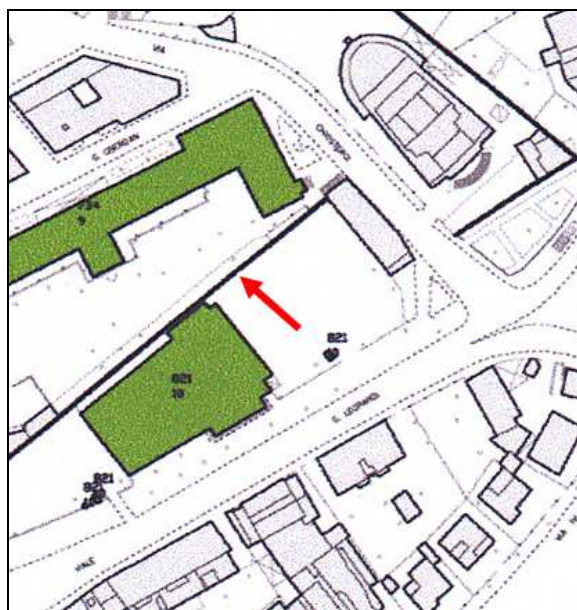



Fig. 64 Ubicazione della stazione di campionamento P4.

Fig. 65 Fotogramma della campitura per la stazione P5 sovrapposto alla muratura: in giallo e rosso rispettivamente mattoni gialli e rossi.

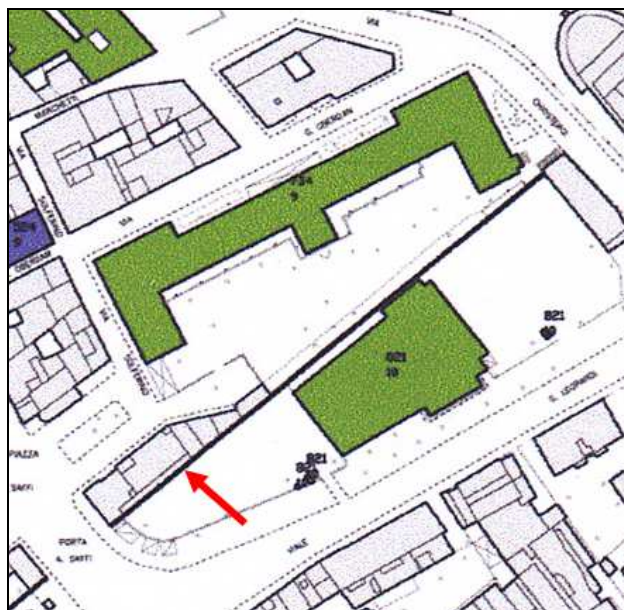



Fig. 66 Ubicazione della stazione di campionamento P5.

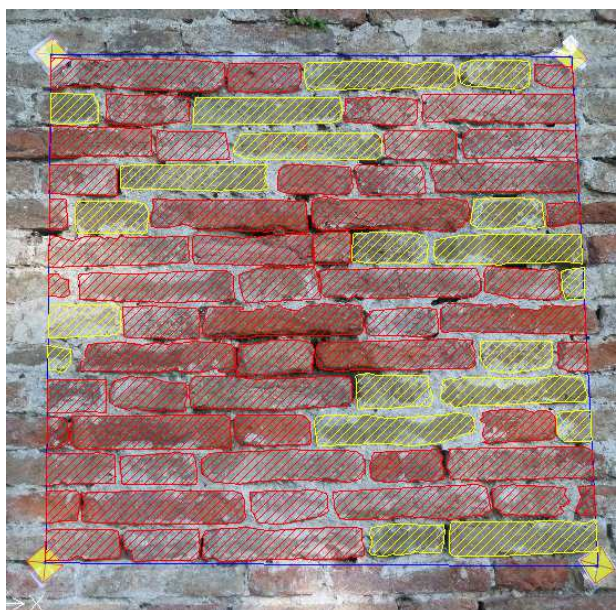



Fig. 67 Fotogramma della campitura per la stazione P6 sovrapposto alla muratura: in giallo e rosso rispettivamente mattoni gialli e rossi.

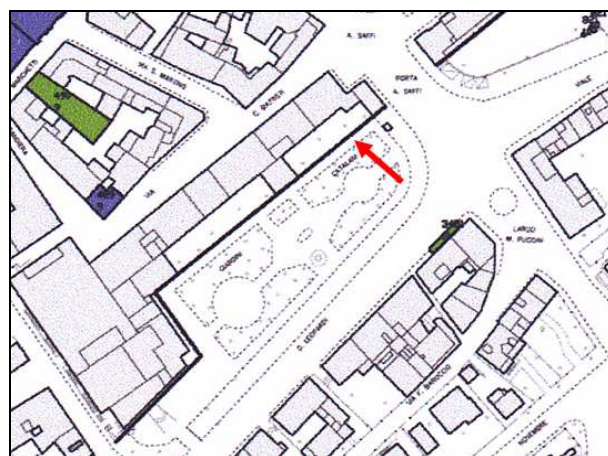



Fig. 68 Ubicazione della stazione di campionamento P6.

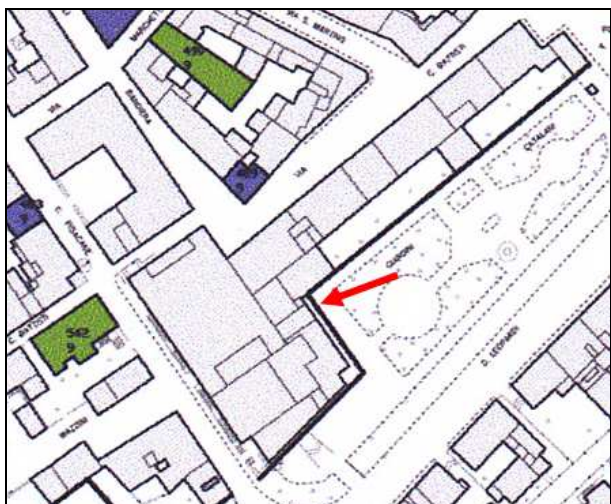



Fig. 69 Ubicazione della stazione di campionamento P7.

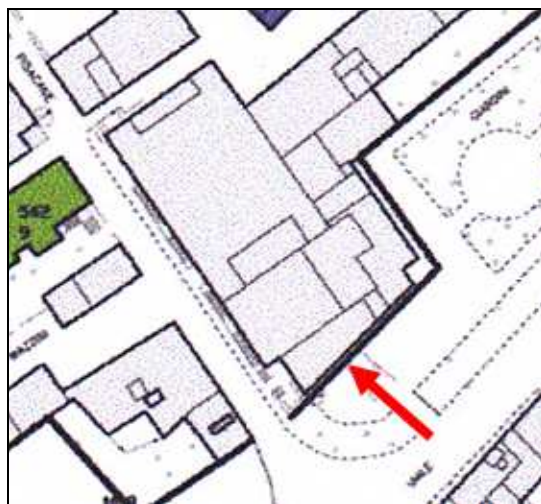



Fig. 70 Ubicazione della stazione di campionamento P8.

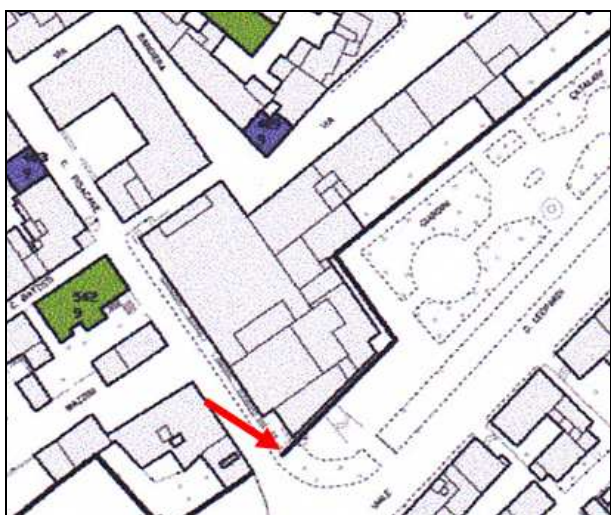



Fig. 71 Ubicazione della stazione di campionamento P9.

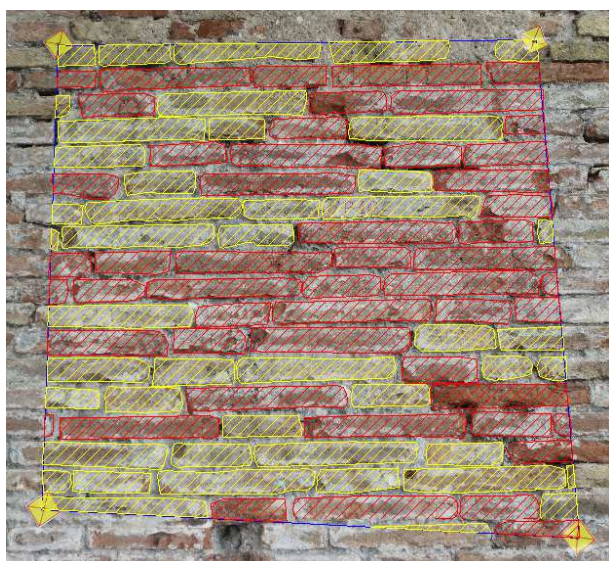



Fig. 72 Fotogramma della campitura per la stazione P10 sovrapposto alla muratura: in giallo e rosso rispettivamente mattoni gialli e rossi.

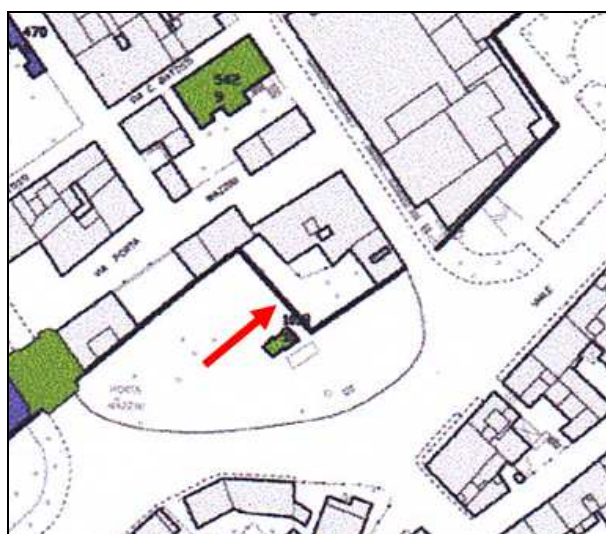



Fig. 73 Ubicazione della stazione di campionamento P10.

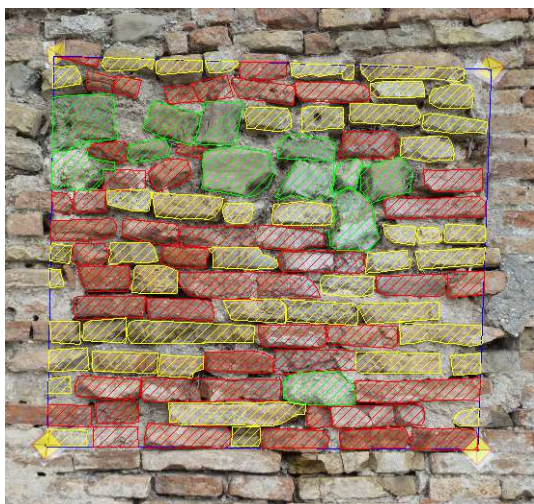



Fig. 74 Fotogramma della campitura per la stazione P11 sovrapposto alla muratura: in verde, giallo e rosso rispettivamente il materiale lapideo, mattoni gialli e rossi.

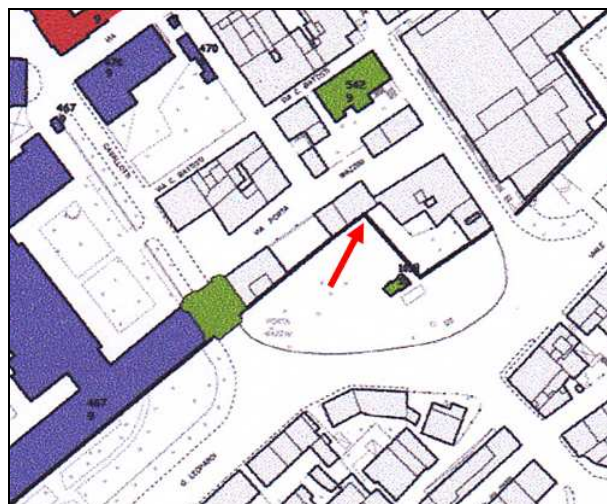



Fig. 75 Ubicazione della stazione di campionamento P11.

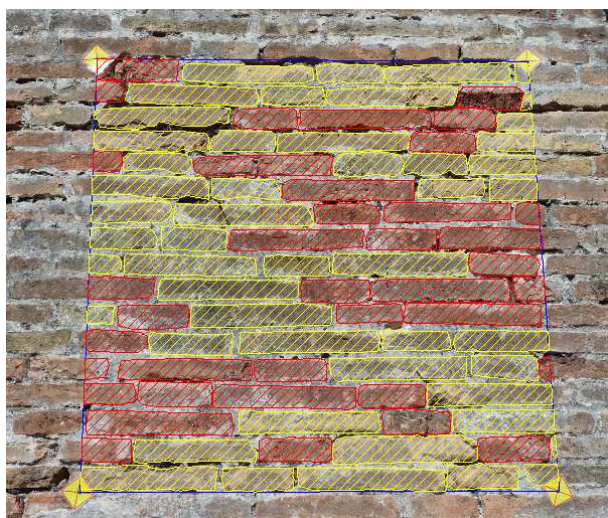



Fig. 76 Fotogramma della campitura per la stazione P12 sovrapposto alla muratura: in giallo e rosso rispettivamente mattoni gialli e rossi.

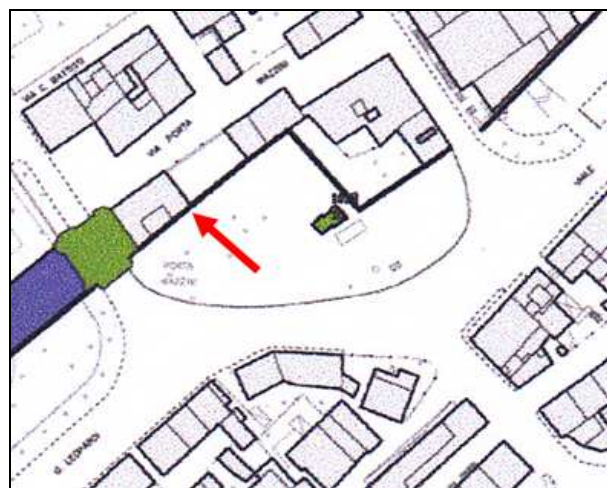



Fig. 77 Ubicazione della stazione di campionamento P12.

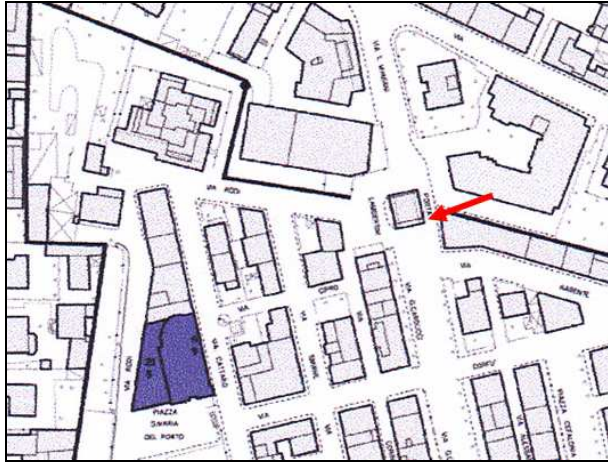



Fig. 78 Ubicazione della stazione di campionamento P13.

Fig. 79 Fotogramma della campitura per la stazione P14 sovrapposto alla muratura: in verde, giallo e rosso rispettivamente il materiale lapideo, mattoni gialli e rossi.

Fig. 80 Ubicazione della stazione di campionamento P14.

Fig. 81 Fotogramma della campitura per la stazione P15 sovrapposto alla muratura: in giallo e rosso rispettivamente mattoni gialli e rossi.

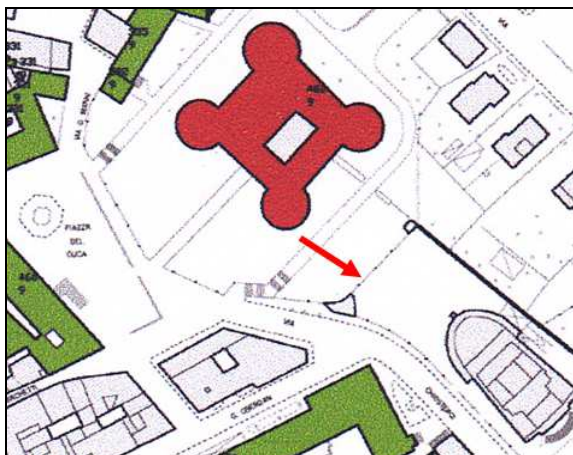



Fig. 82 Ubicazione della stazione di campionamento P15.

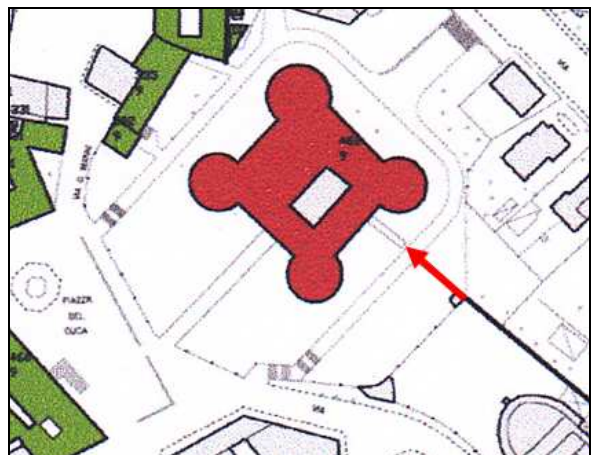



Fig. 82 Ubicazione della stazione di campionamento P16.

3. IMMAGINI SEM

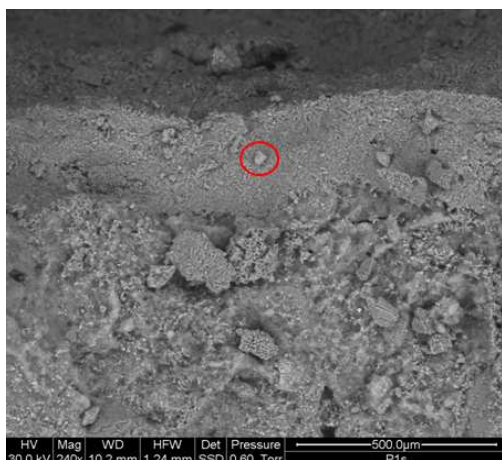



Fig. 83 Campione P1s: crosta.

Fig. 84 Campione P1s: ingrandimento della crosta.

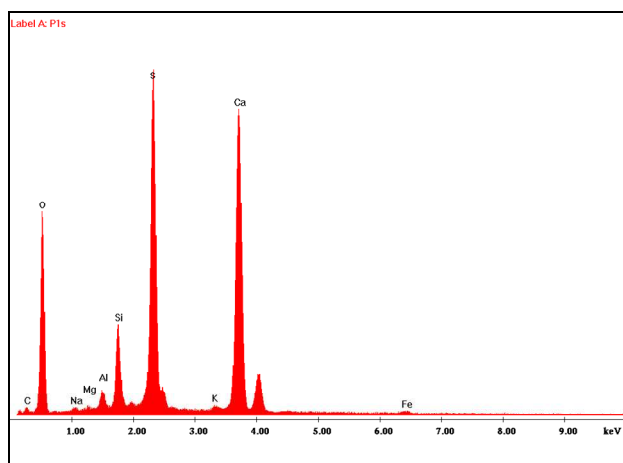



Fig. 85 Campione P1s: analisi della composizione chimica areale della crosta nella zona centrale per la parte più fine.

Fig. 86 P1s: ingrandimento della crosta spostandosi di circa 100 µm verso l'interno.

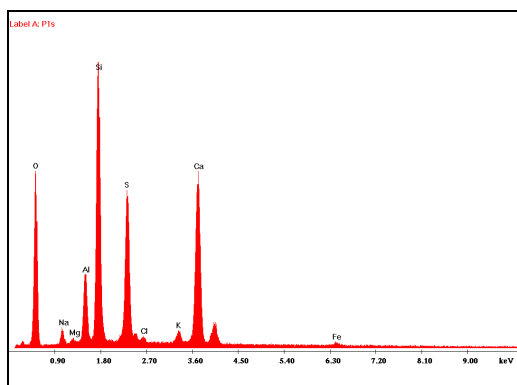



Fig. 87 Campione P1: analisi chimica della crosta che evidenzia l'abbondanza di silicio mentre diminuisce lo zolfo; si rinvengono anche Cl^- e Na^+. Le tracce di ferro sono molto probabilmente legate al taglio del campione con la sega.

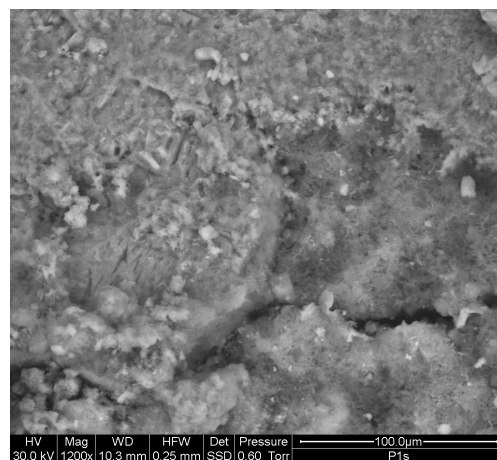



Fig. 88 Campione P1s: inizio della porzione non alterata del campione.

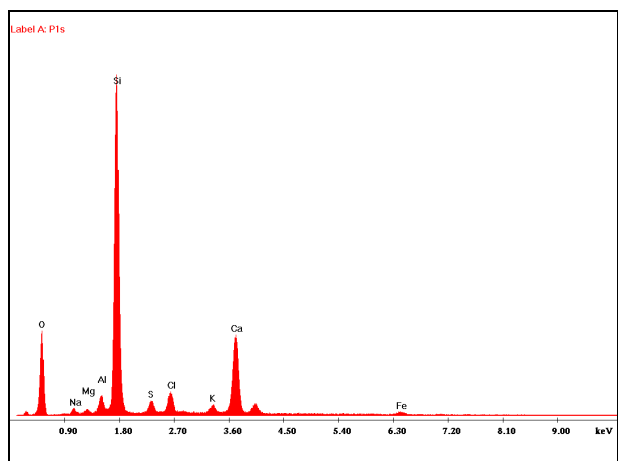



Fig. 89 Campione P1s: analisi chimica per la parte più esterna della porzione inalterata; è presente molto silicio, mentre c'è pochissimo zolfo.

Fig. 90 Campione P1s: panoramica generale delle zone precedentemente individuate; andando più in basso si ha una situazione omogenea in cui si individuano numerosi cristalli di quarzo.

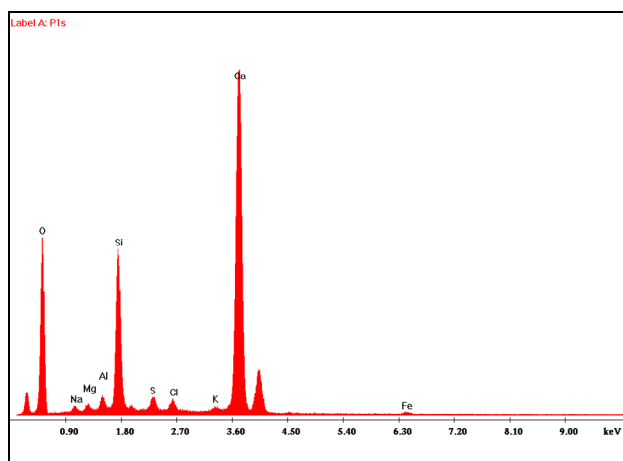



Fig. 91 Campione P1s: Analisi chimica della zona non alterata da cui si individua un maggior contenuto in calcio rispetto al silicio.

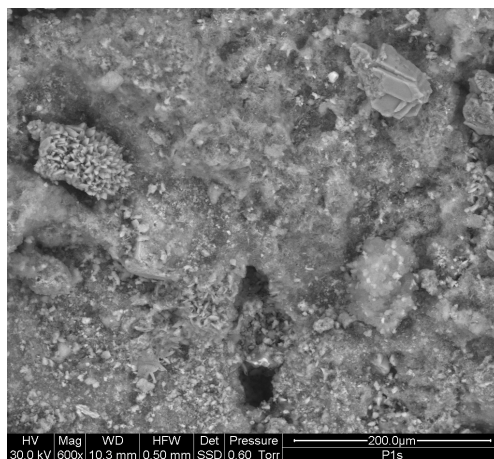



Fig. 92 Campione P1s: porzione non alterata e presenza di numerosi cristalli contenenti Ca^{++}.

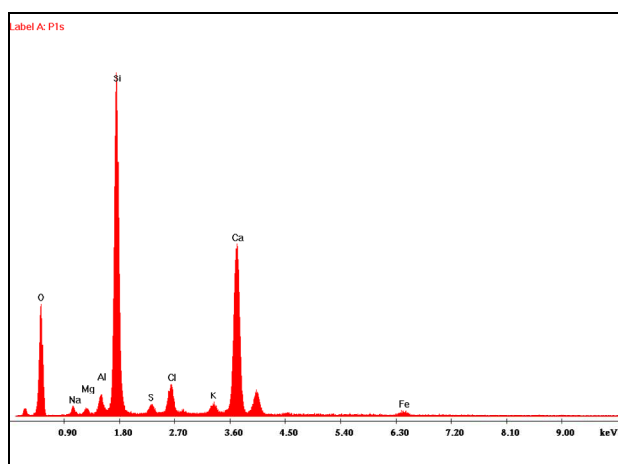



Fig. 93 Campione P1: presenza di cristalli contenenti calcio; lo zolfo risulta quasi assente; si rinviene moltissimo silicio.

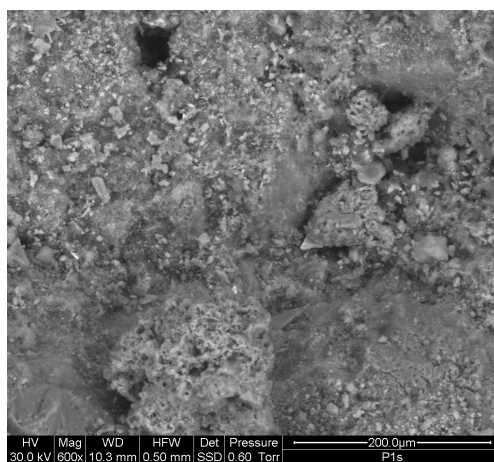



Fig. 94 Campione P1s: porzione inalterata.

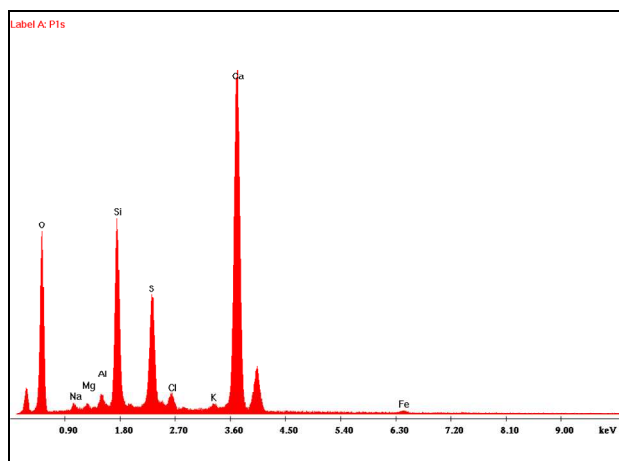



Fig. 95 Campione P1s: grande quantità di calcio e risalita del valore di zolfo.

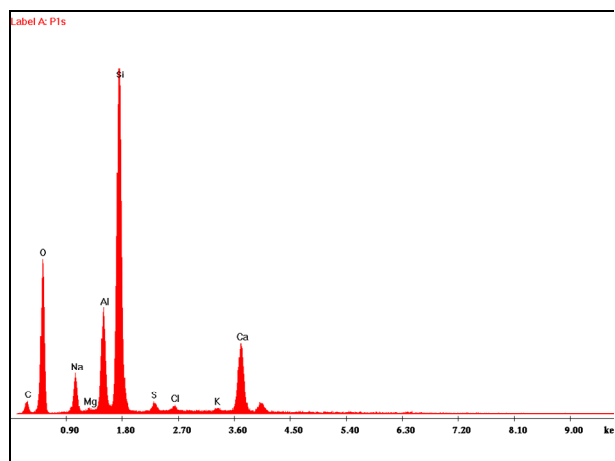



Fig. 96 Campione P1s: picco di silicio e abbondanza di alluminio .

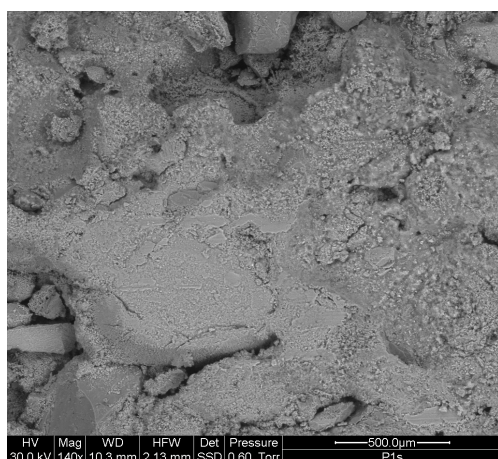



Fig. 97 Campione P1s: zona inalterata.

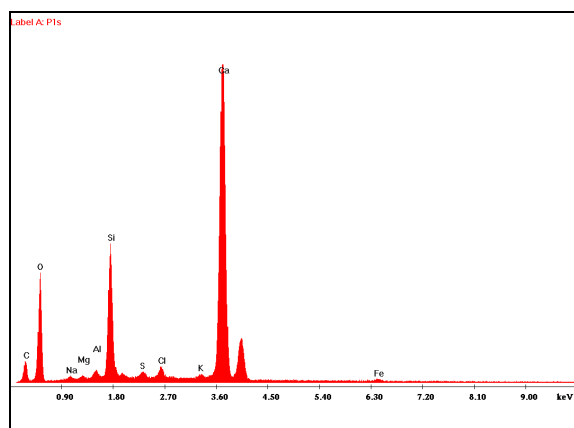



Fig. 98 Campione P1s: viene confermato l'elevato contenuto in Ca^{++}; si rinvengono anche alluminio e zolfo seppure in piccolissime percentuali; il ferro risulta quasi assente.

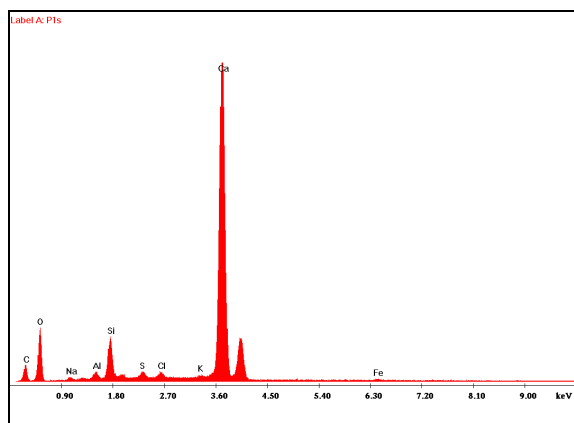



Fig. 99 Campione P1s: grande quantità di calcio; pochissimo zolfo.

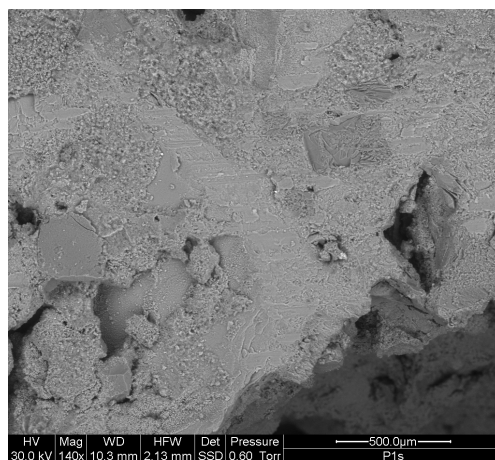



Fig. 100 Campione P1s: zona inalterata.

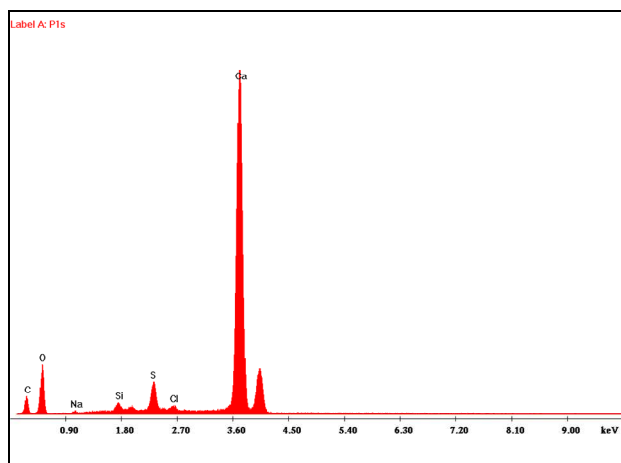



Fig. 101 Campione P1s: altissima percentuale di Ca^{++}.

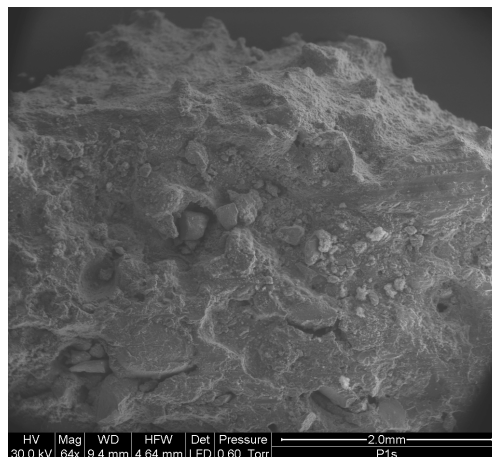



Fig. 102 Campione P1s: foto con gli elettroni secondari (informazione morfologica).

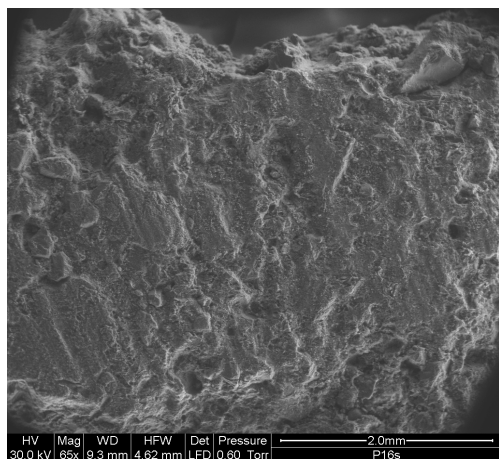



Fig. 103 Campione P1s: Foto con gli elettroni secondari (informazione morfologica).

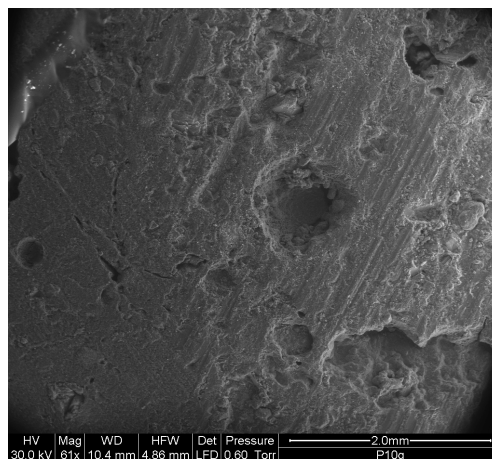



Fig. 104 Campione P1s: Foto con gli elettroni secondari (informazione morfologica).

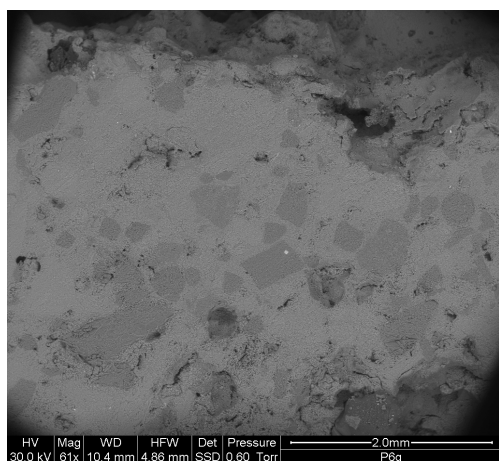



Fig. 105 Campione P6g: foto generale.

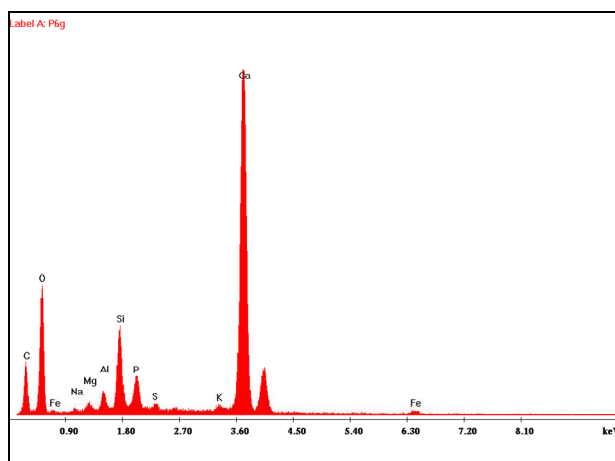



Fig. 106 Campione P6g: crosta composta principalmente da calcio (poco zolfo); nella crosta è presente quasi sempre anche il fosforo.

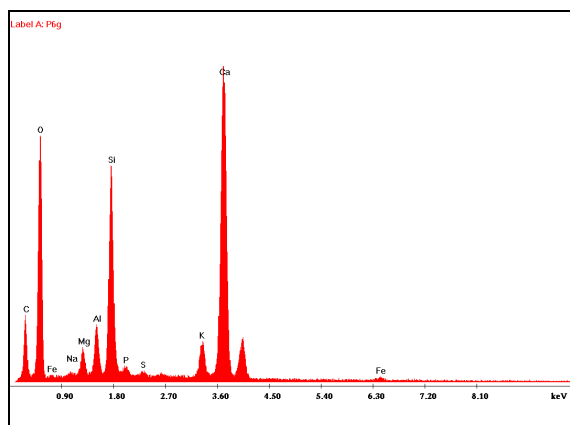



Fig. 107 Campione P6g: crosta nella parte più a sinistra.

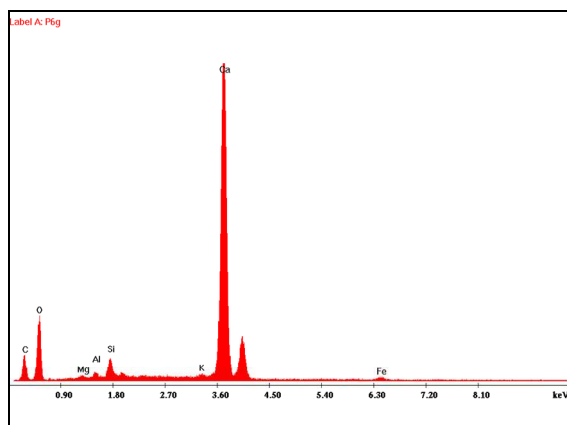



Fig. 108 Campione P6g: ulteriore conferma della costanza nella composizione chimica della crosta.

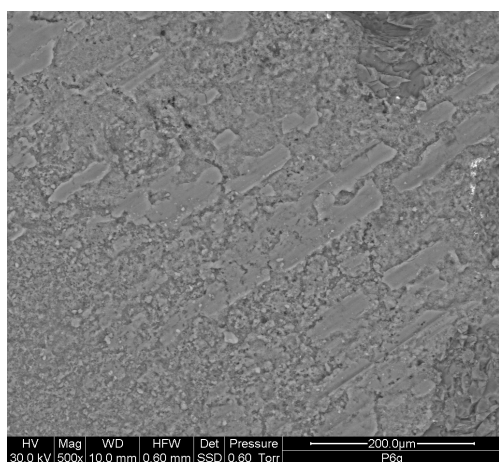



Fig. 109 Campione P6g: spostamento verso l'interno; foto della matrice ingrandita.

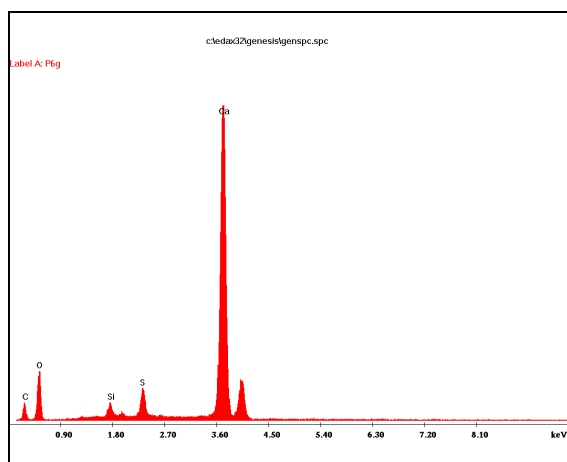



Fig. 110 Campione P6g: analisi chimica che conferma il picco di Ca^{++}.

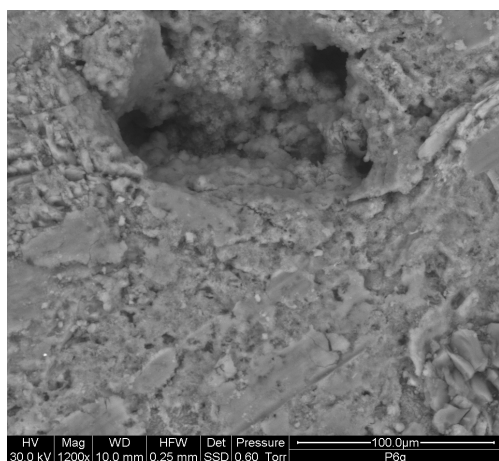



Fig. 111 Campione P6g: foto della matrice.

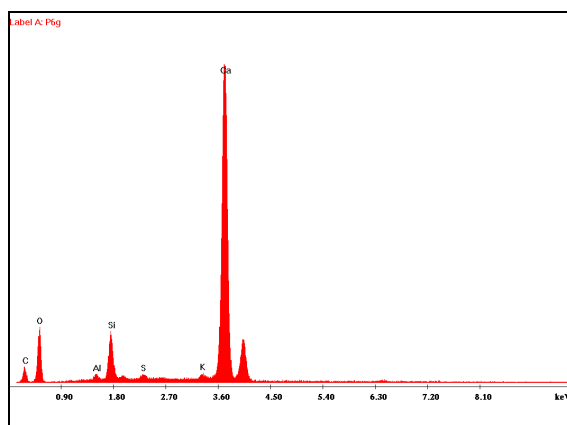



Fig. 112 Campione P6g: analisi chimica della matrice.

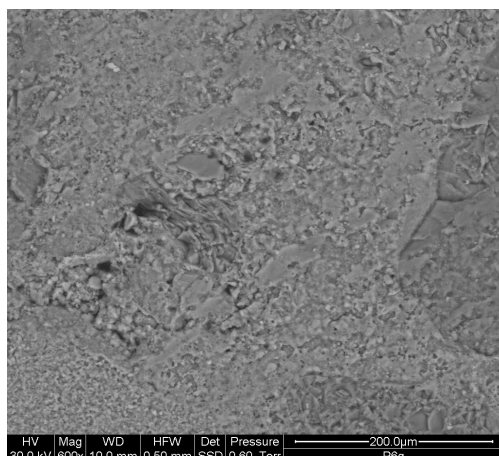



Fig. 113 Campione P6g: area compresa tra due grandi clasti.

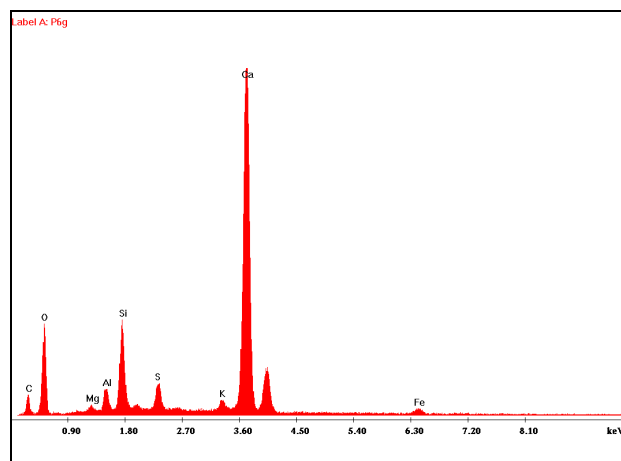



Fig. 114 Campione P6g: analisi chimica dell'area compresa tra due grandi clasti (foto precedente); si osservi come la composizione chimica non vari molto tra interno ed esterno.

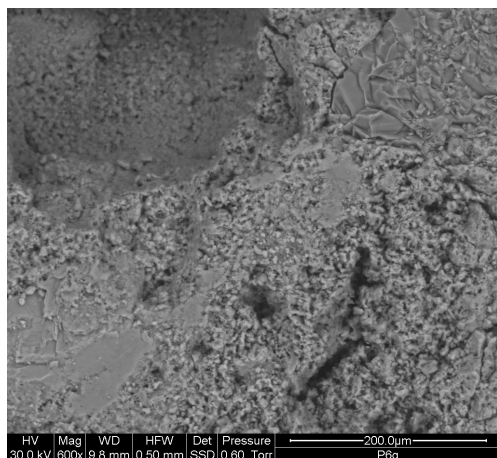



Fig. 115 Campione P6g: cambiamento nella granulometria della matrice.

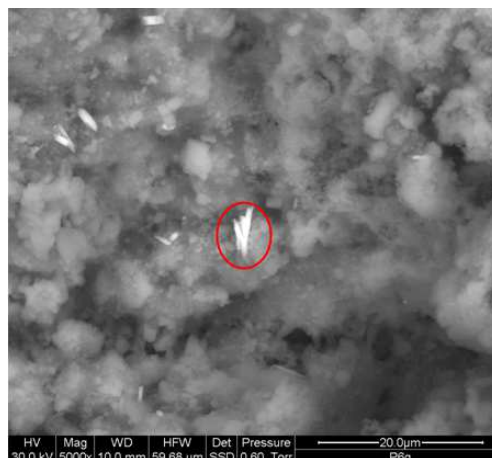



Fig. 116 Campione P6g: si riscontra la presenza di bario (solfati di bario); si tratta di cristalli di neoformazione.

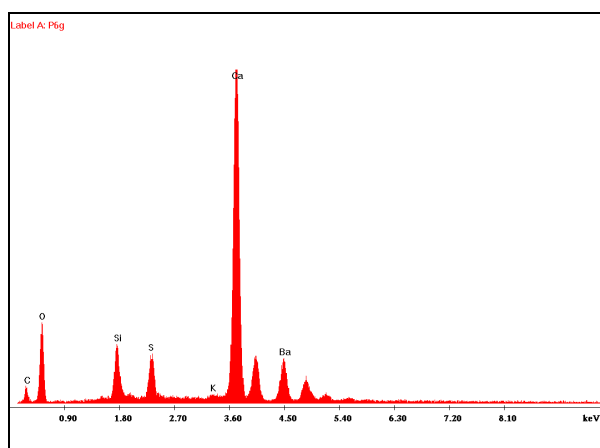



Fig. 117 Campione P6g: si riscontra la presenza di bario (solfati di bario); si tratta di cristalli di neoformazione.

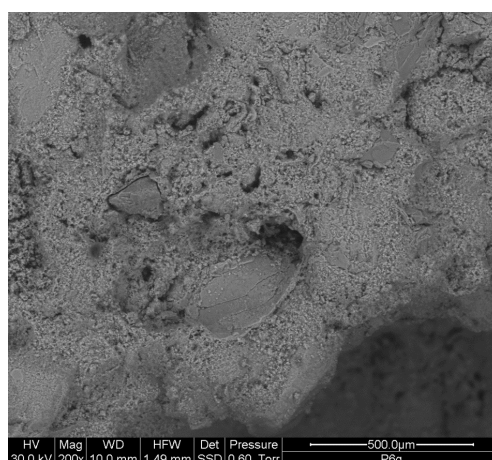



Fig. 118 Campione P6g: foto fondo campione.

Fig. 119 Campione P6g: zona ricca in solfati di bario.

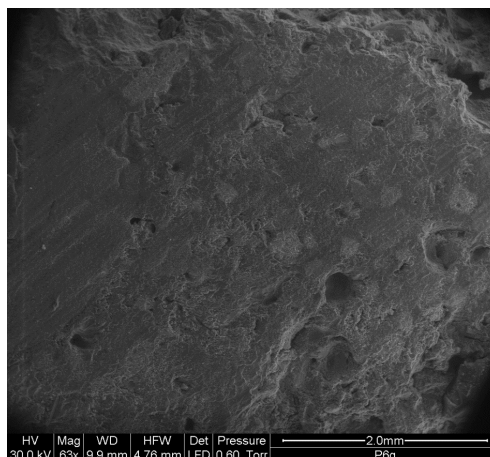



Fig. 120 Campione P6: foto elettroni secondari (informazione morfologica).

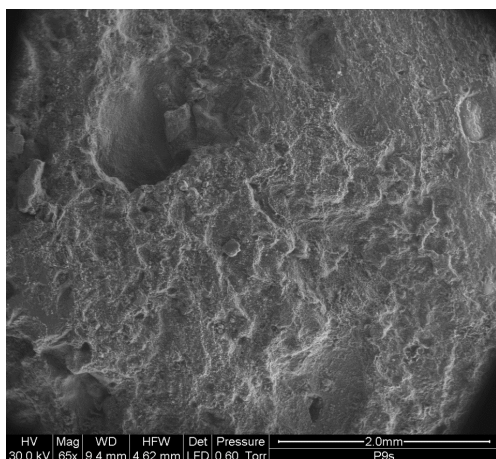



Fig. 121 Campione P6g: foto elettroni secondari (informazione morfologica).

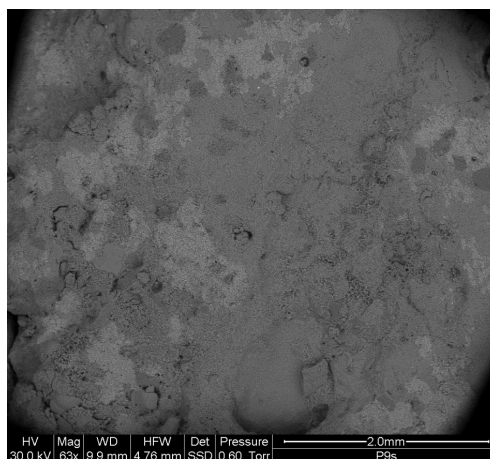



Fig. 122 Campione P9s: foto generale da cui sembra di individuare due differenti tipi di matrice (corrispondenti a due diverse tonalità di grigio).

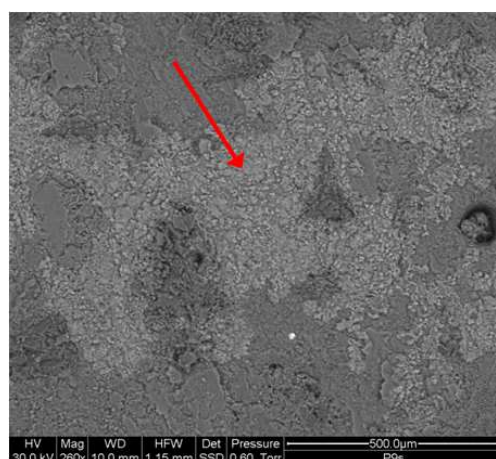



Fig. 123 Campione P9s: foto ad alto ingrandimento. C'è un vero e proprio strato di sale (è una crosta) e molto probabilmente è presente anche all'interno del campione (parte più chiara).

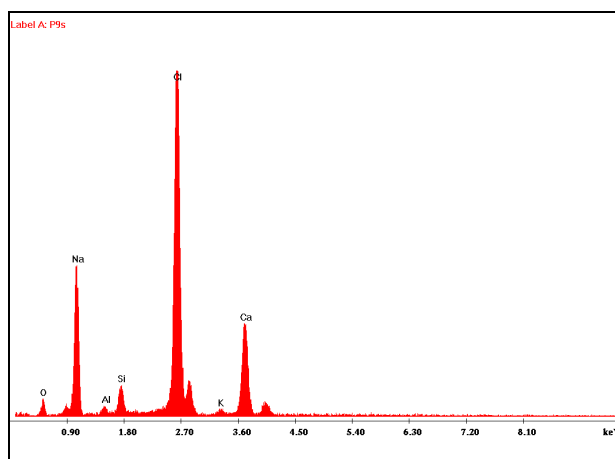



Fig. 124 Campione P9s: analisi chimica.

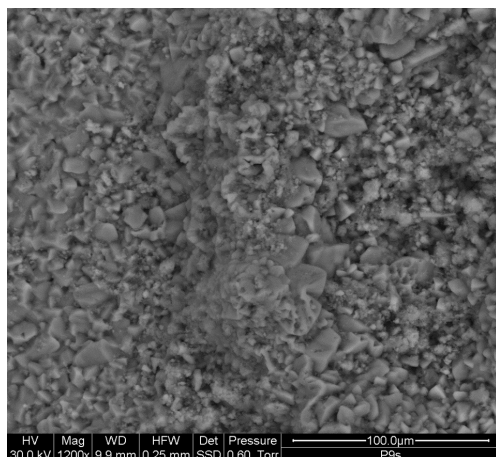



Fig. 125 Campione P9s: cristalli contenenti Ca^{++}.

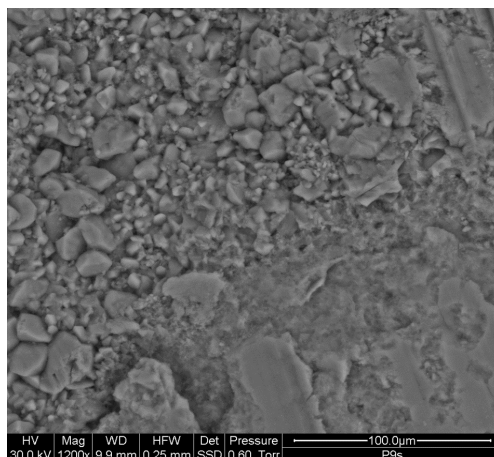



Fig. 126 Campione P9s: cristalli contenenti Ca^{++}.

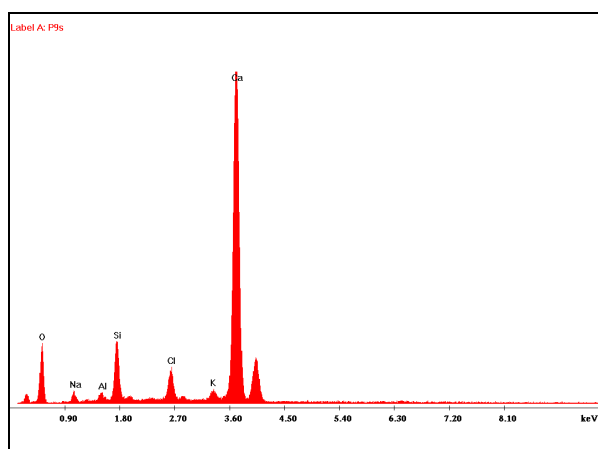



Fig. 127 Campione P9s: composizione chimica relativa a fig. 125.

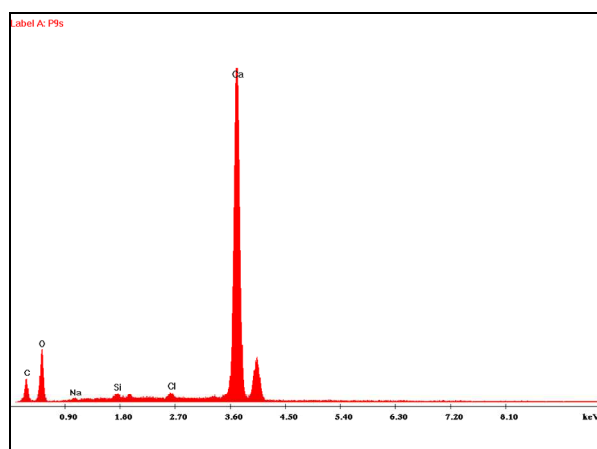



Fig. 128 Campione P9s: composizione chimica relativa a fig. 126.

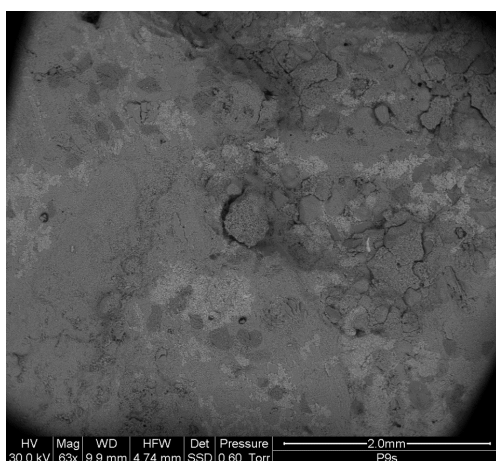



Fig. 129 Campione P9s: presenza di un vero e proprio "grumo " centrale.

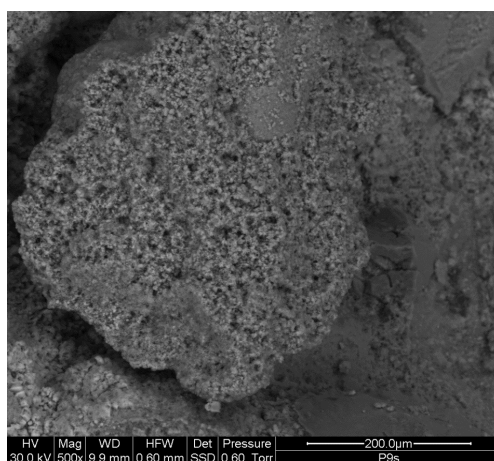



Fig. 130 Campione P9s: dettaglio di fig. 129.

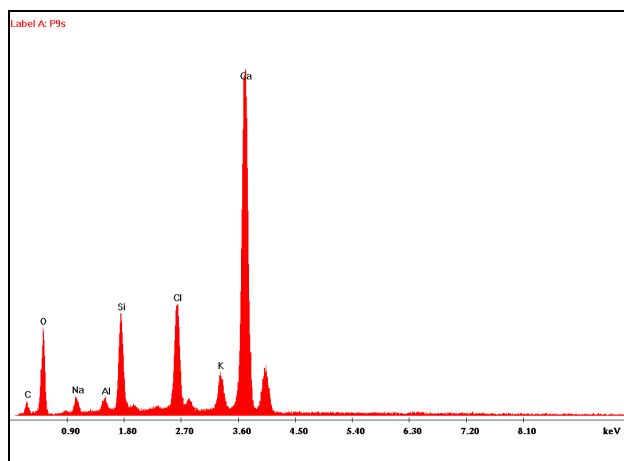



Fig. 131 Campione P9s: analisi chimica in cui si osserva predominio di Ca^{++} ma anche una buona percentuale di silicio e cloro (analisi relativa al "grumo").

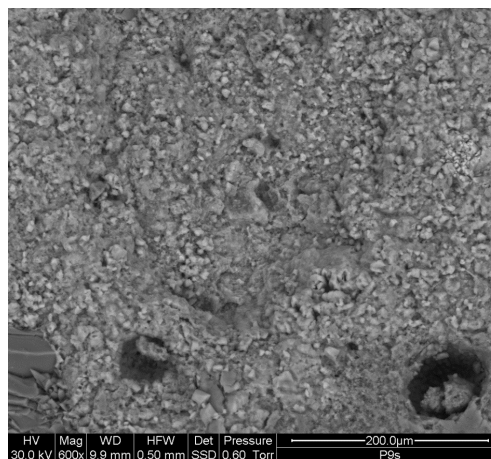



Fig. 132 Campione P9s: presenza zona alterata di colore chiaro più in basso (sale).

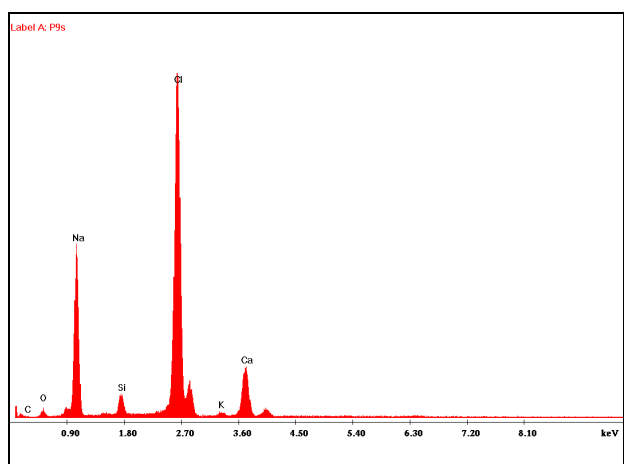



Fig. 133 Campione P9: presenza zona alterata di colore chiaro più in basso (sale); ho un vero e proprio picco di Cl^{-}.

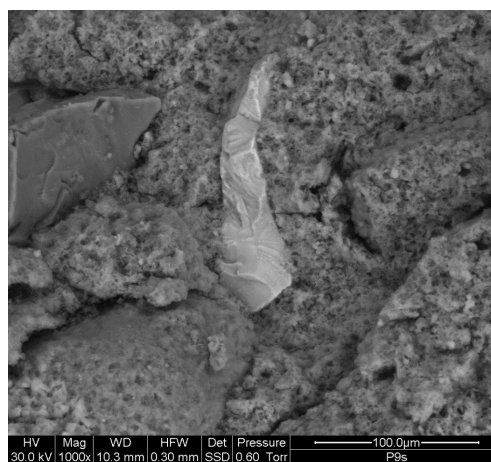



Fig. 134 Campione P9s: cristallo contenente titanio (conferma dall'analisi chimica).

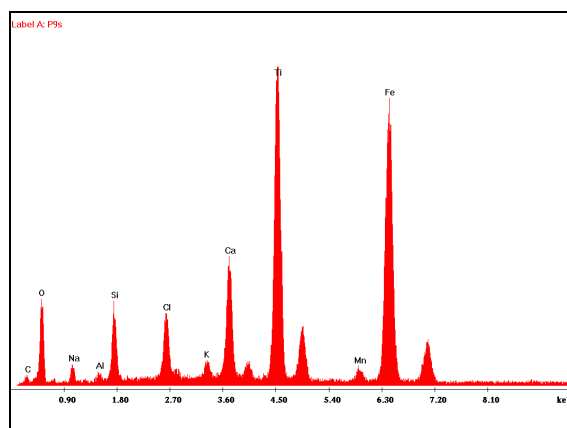



Fig. 135 Campione P9s: analisi chimica che evidenzia l'abbondanza di elementi particolari quali titanio e ferro, oltre a calcio e cloro; compare anche manganese.

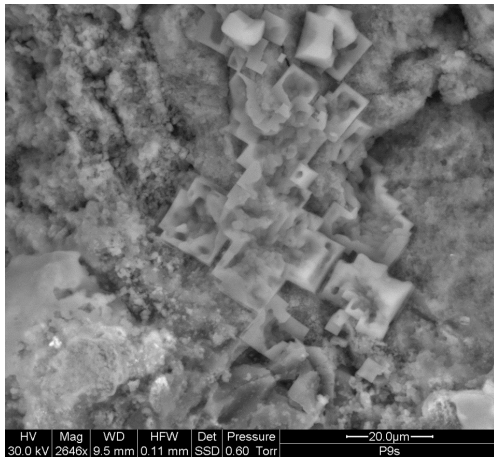



Fig. 136 Campione P9s: cristalli di NaCl dal caratteristico abito cristallino cubico.

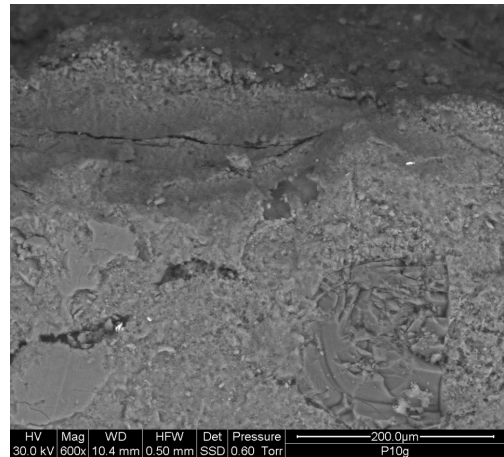



Fig. 137 Campione P10g: foto generale back scattered nella porzione destra del campione.

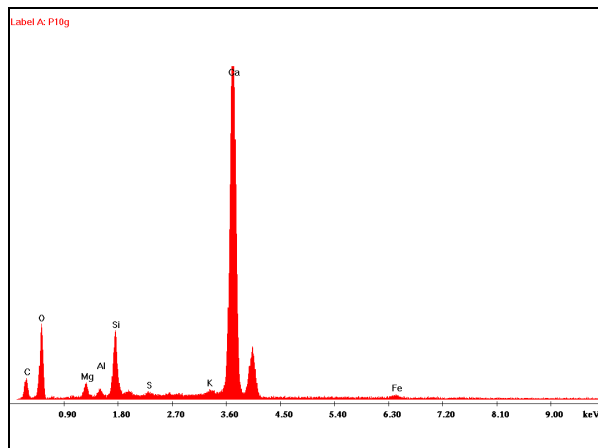



Fig. 138 Campione P10g: analisi superficie più esterna in cui si rileva soprattutto la presenza di Ca^{++}.

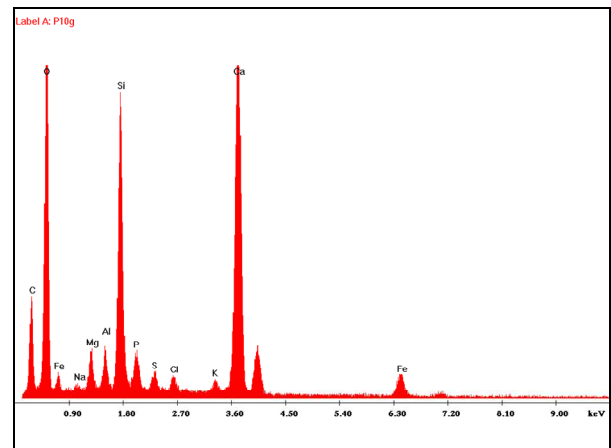



Fig. 139 Campione P10g: situazione particolare in cui si rileva la presenza di cristalli di selce.

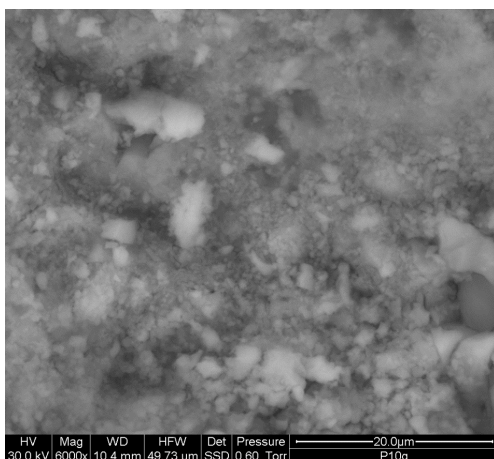



Fig. 140 Campione P10g: punto centrale.

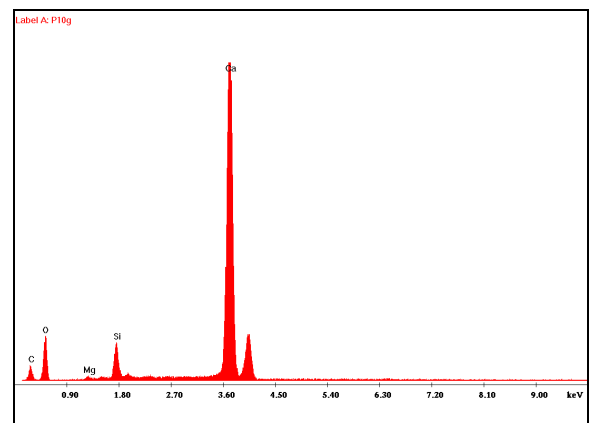



Fig. 141 Campione P10g: punto centrale; predomina Ca^{++}.

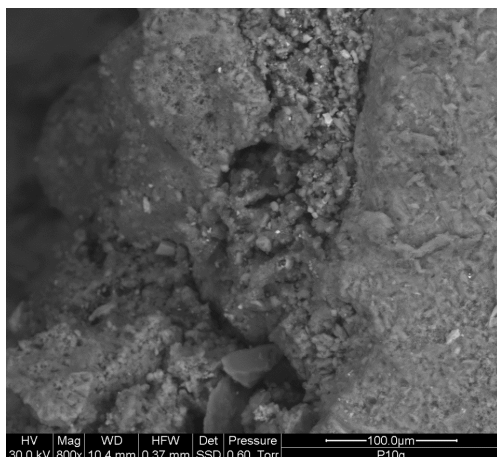



Fig. 142 Campione P10g: sinistra del campione (crosta).

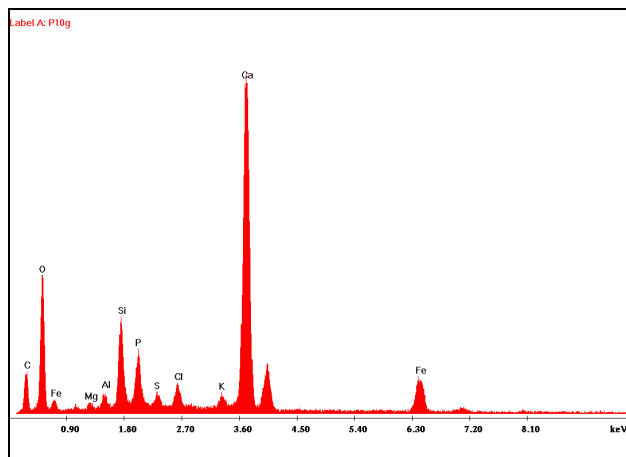



Fig. 143 Campione P10g: dall'analisi della crosta nella zona centrale si osserva che questa è costituita quasi interamente da calcio; si rileva anche la presenza di un po' di ferro.

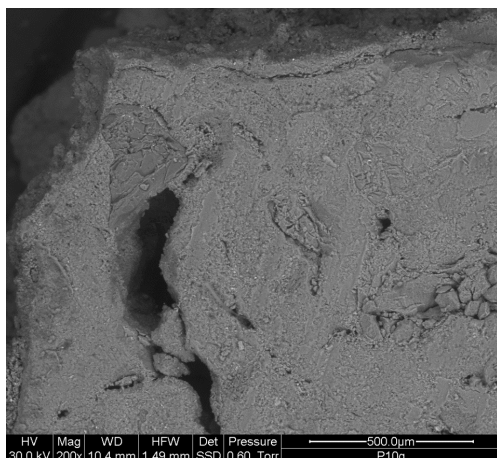



Fig. 144 Campione P10g.

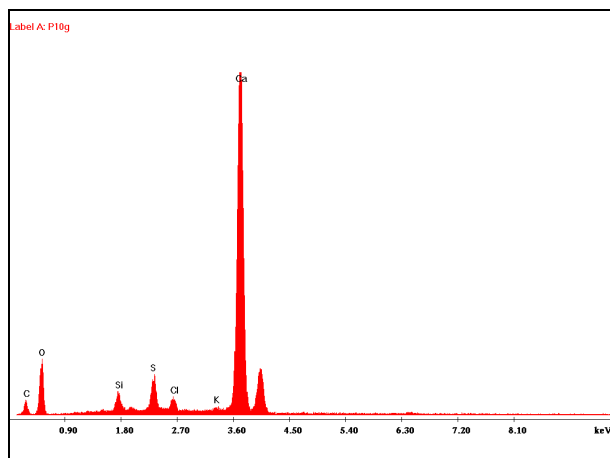



Fig. 145 Campione P10g: analisi chimica area fig. 144.

Fig. 146 Campione P10g: foto di un clasto.

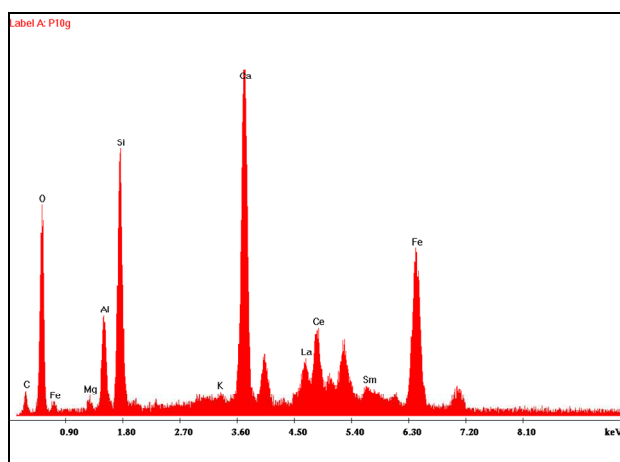



Fig 147 Campione P10g: composizione clasto di fig. 146.

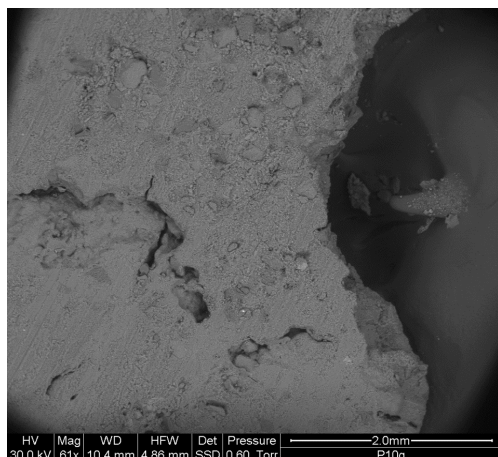



Fig. 148 Campione P10g: immagine con gli elettroni secondari (informazione morfologica).

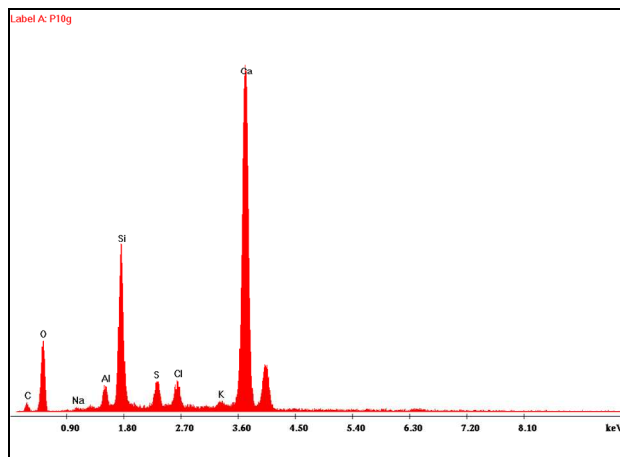



Fig. 149 Campione P10g: analisi chimica della parte centrale del campione.

Fig. 150 Campione P16s: campione molto grossolano ricco di clasti anche molto grandi.

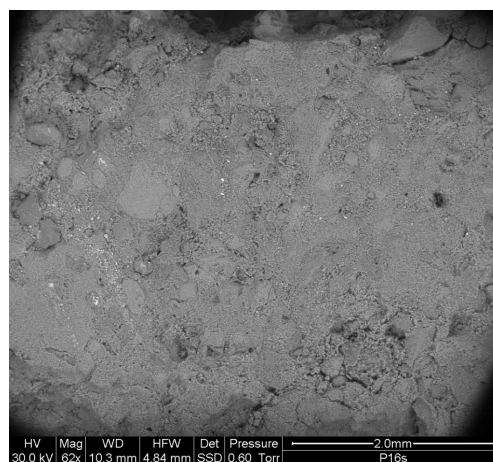



Fig. 151 Campione P16s: campione molto grossolano ricco di clasti anche molto grandi.

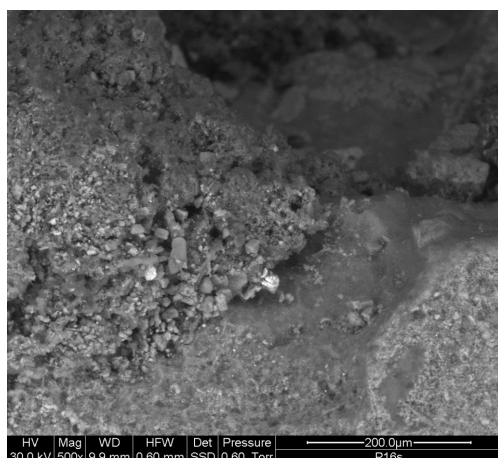



Fig. 152 Campione P16s: porzione più esterna.

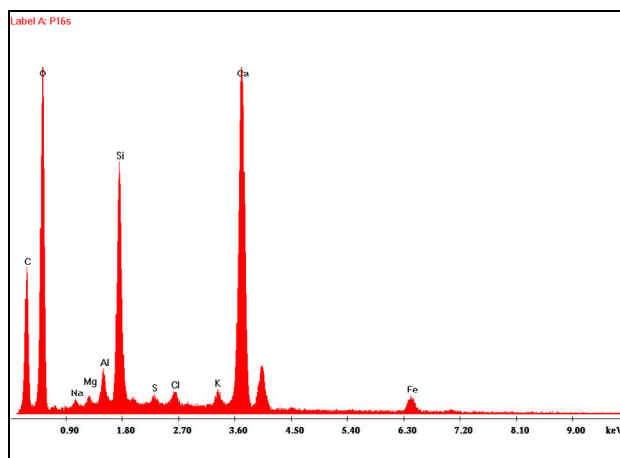



Fig. 153 Campione P16s: analisi della porzione più esterna; è presente molto Ca^{++}, poco S^{2-}.

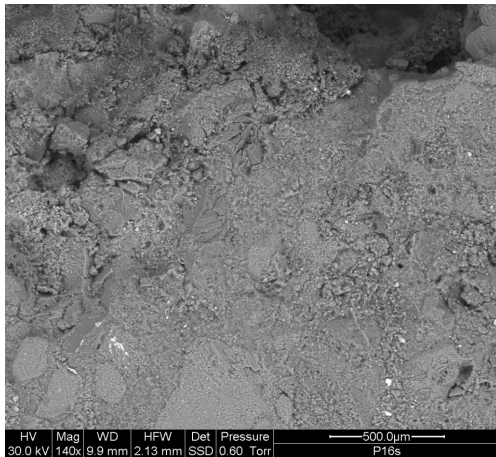



Fig. 154 Campione P16s: foto scattata nella porzione più interna del campione.

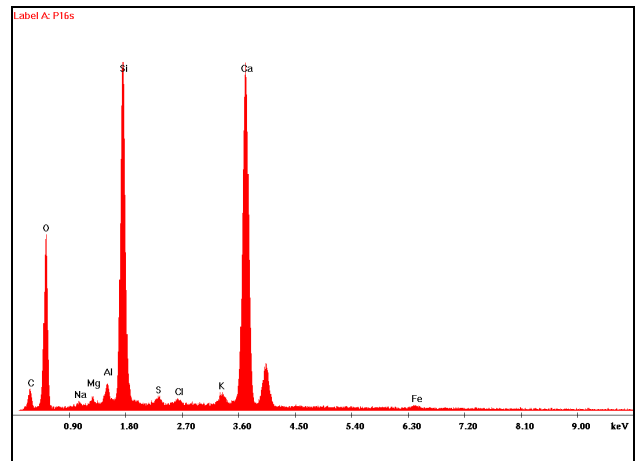



Fig. 155 Campione P16s: spostandosi più in profondità si riscontra pressappoco la stessa quantità di calcio e silicio; lo zolfo è sempre pochissimo; si individuano delle zone macchiettate di bianco.

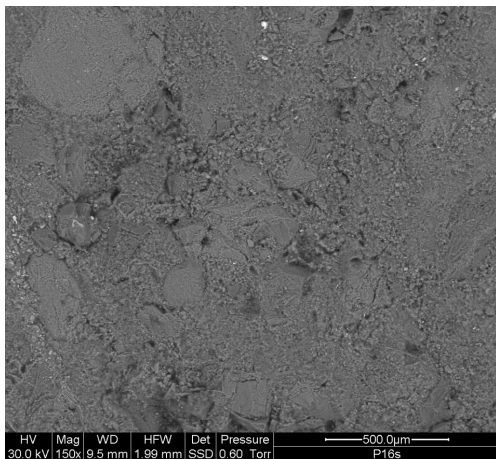



Fig. 156 Campione P16s: presenza di molti clasti di quarzo; il campione risulta molto uniforme e composto principalmente da calcio, silicio e talvolta con aumenti del contenuto di ferro.

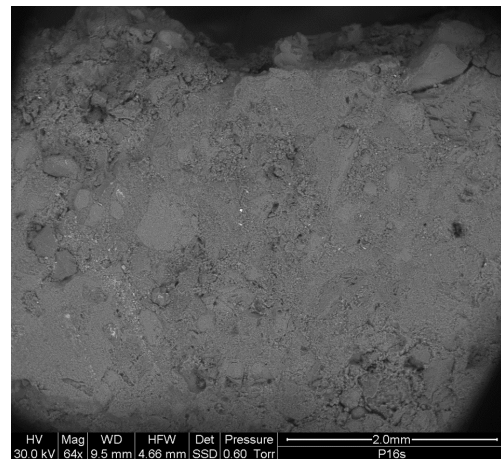
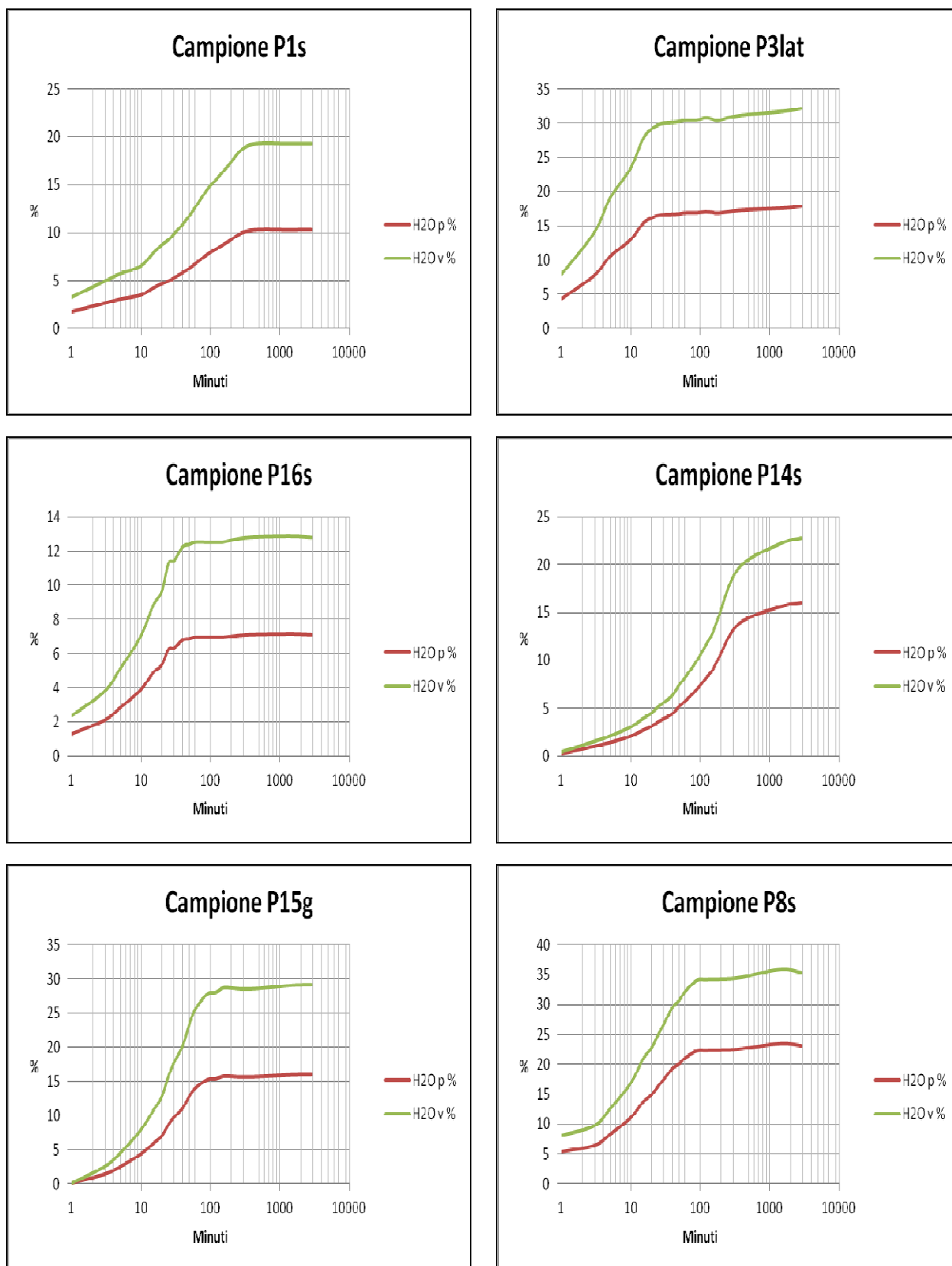
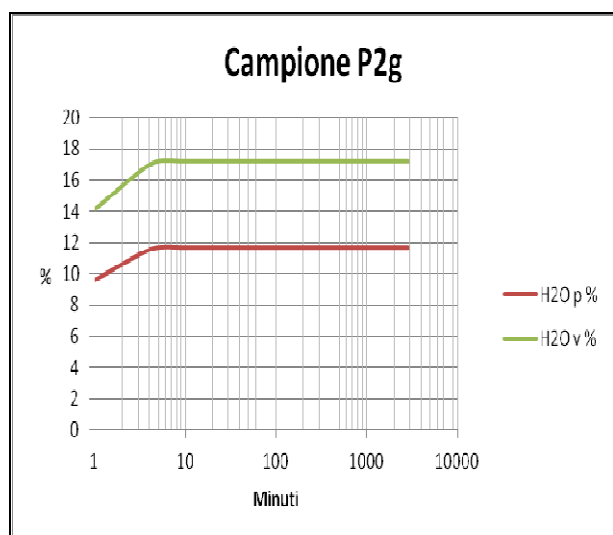
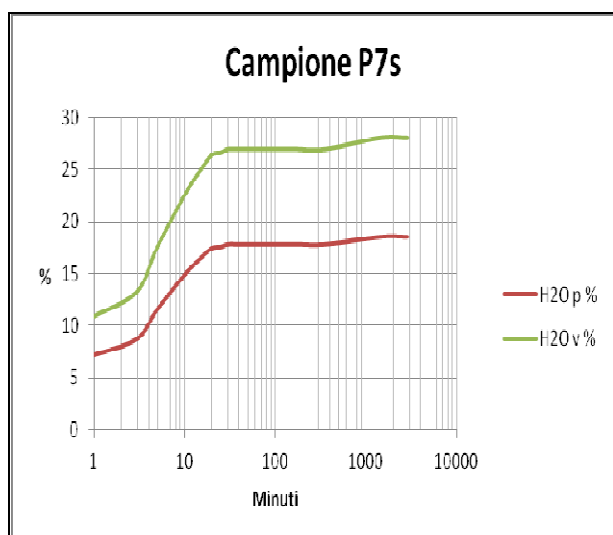
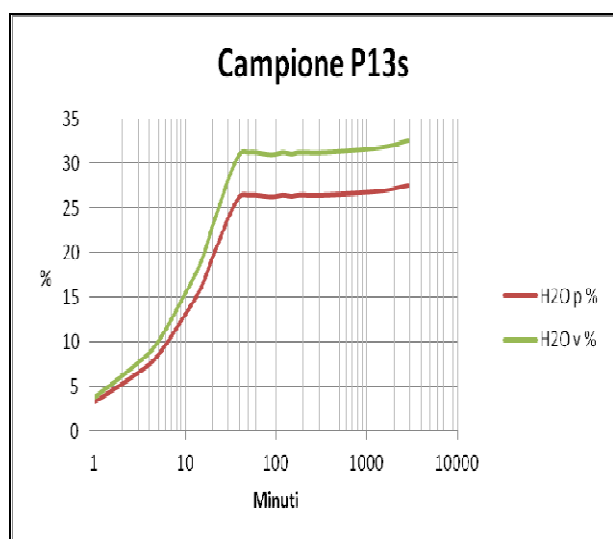
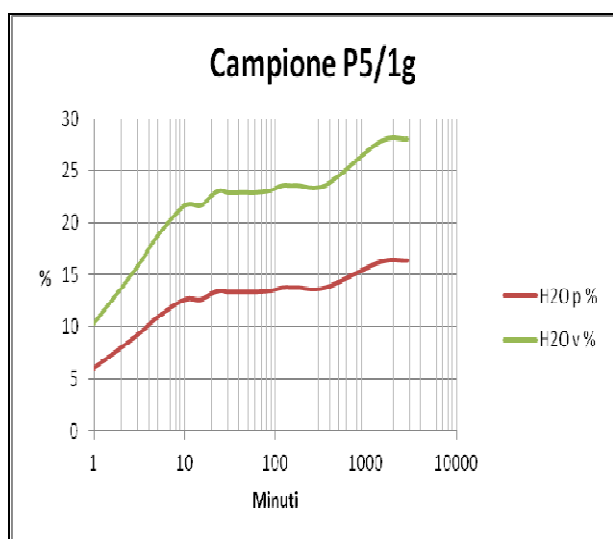
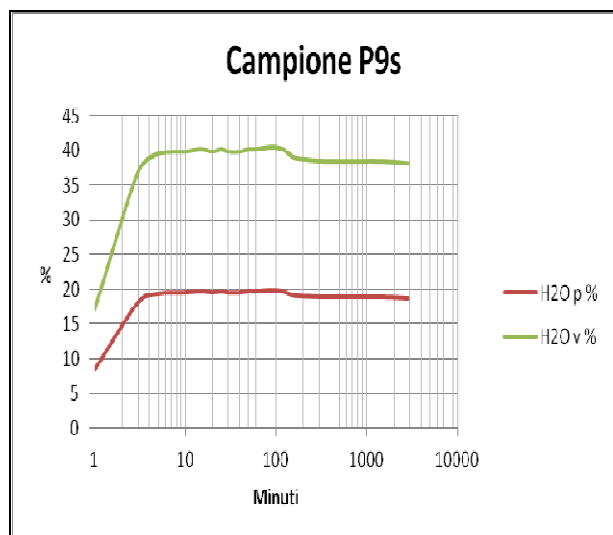
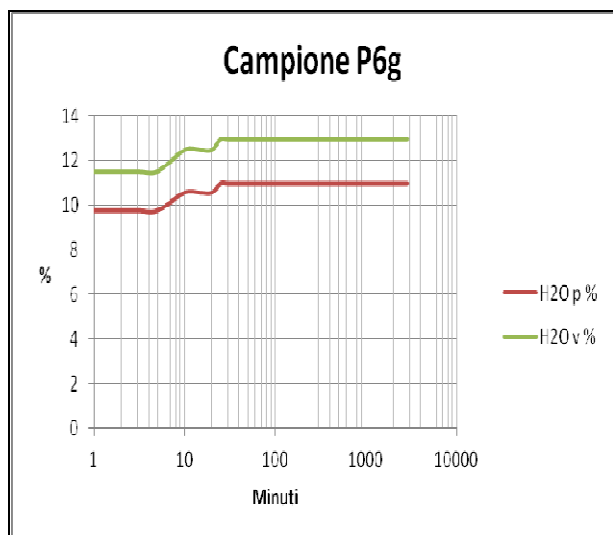



Fig. 157 Campione P16s: foto generale back scattered.

4. PROVE DI ASSORBIMENTO CAPILLARE

Figg. 158-163 Risultati prove assorbimento capillare espressi in percentuali in peso e in volume di acqua (C.I.p% e C.I.v%).

Figg. 164-169 Risultati prove assorbimento capillare espressi in percentuali in peso e in volume di acqua (C.I.p% e C.I.v%).